

13014
626
Я 79
Т Р У Д Ы

Среднеазиатского научно-исследовательского института
иригации

Выпуск 21

Инж. В. Н. Ярцев, Г. Н. Буркин,
М. С. Вызго, В. Н. Дмитриевский,
К. К. Дмитриев, Я. А. Никитин.

КОЭФИЦИЕНТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ

искусственных иригационных сооружений
Средней Азии

Сборник

САМБИРИ
ТАШКЕНТ
1935

ДРОВ. 1951 г. ✓

ТРУДЫ

Среднеазиатского научно-исследовательского института
ирригации

Выпуск 21

Инж. В. Н. Ярцев, Г. И. Туркин,
М. С. Вызго, В. Н. Дмитриевский,
К. К. Дмитриев, Я. А. Никитин.

628.8

А 79

13074

(13074)

КОЭФИЦИЕНТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ

искусственных ирригационных сооружений
Средней Азии

БИБЛИОТЕКА
Среднеазиатского научно-исследовательского
института ирригации
Д. А. ЯРЦЕВ
Выпуск 21

ПРИ
ЛЖЕНТ

1935

ОБРАЗЦАНО

Предисловие

Возможно ли при советской социалистической системе плановости, разрабатывая какой бы то ни было вопрос, не учитывать опыта, приобретенного практической деятельностью предыдущего периода. На этот вопрос может быть дан только один ответ—нет, нельзя.

Поэтому очевидно, что и опыт ирригационного строительства в Средней Азии должен постоянно учитываться при дальнейших работах.

Применение старых норм и конструкций в одних случаях, применение постоянно совершенствуемых, а зачастую и таких, которые еще не были нигде опробованы конструкций и расчетных коэффициентов—таково строительство первого пятилетия. Настоятельно необходимо перед дальнейшим применением нововведений и их новой рационализации учесть опыт уже проделанной работы. Эта чрезвычайно ответственная задача сложна и многогранна, так же как сложно многообразие различных областей ирригационного и гидротехнического строительства.

Приступая к осуществлению грандиозных работ первого пятилетия, ирригационные органы имели в своем распоряжении расчетные коэффициенты, в большинстве своем взятые из опыта зарубежных стран, не всегда совпадающие с теми условиями, которые на самом деле окажутся в Средней Азии. К настоящему времени много возможностей для проверки правильности принятых предположений. Не будет преувеличением считать Среднюю Азию гидротехнической лабораторией колоссальных размеров и масштабов. Игнорирование этой лаборатории должно считать грубейшей ошибкой.

Очевидно, необходимо приложить максимальные усилия к тому, чтобы эту лабораторию действительно использовать, как лабораторию для получения наиболее достоверных данных о работе каналов и гидросооружений в натуральную величину.

Для этого ирригационные органы должны стремиться снять опыт с выстроенных объектов возможно полнее с тем, чтобы ввести необходимые коррективы к принятым нормам и расчетным коэффициентам, учесть работу вновь введенных конструкций и иметь возможность вести их дальнейшую рационализацию.

Комплекс вопросов здесь велик. Концентрация исследований, объединенное направление мысли и работы и плановое выполнение необходимо. САНИИРИ, учитывая всю важность отмеченных работ, предлагал и предлагает органам водного хозяйства координировать эту работу вокруг САНИИРИ.

Кроме исследований, финансируемых заинтересованными ирригационными органами, часть госбюджетных ассигнований САНИИРИ направляется на проработку того же вопроса—снятие на местах опыта строительства первой пятилетки и предшествующего периода.

Одним из вопросов этих исследований является исследование коэффициентов шероховатости в естественном грунте или облицованных, т. е. быстротоков.

Особенно в первые годы деятельности института полевые исследования касались преимущественно вопроса изучения коэффициентов шероховатости ирригационных каналов в естественных условиях и,

главным образом, определения их значения для естественных грунтов, свойственных Средней Азии.

Необходимость исправления рекомендуемых справочными расчетными таблицами коэффициентов в условиях Средней Азии впоследствии вполне подтвердилась. Несколько позднее институт смог подобными же полевыми исследованиями приступить к уточнению коэффициентов шероховатости и для облицованных русел, участков каналов и ирригационных сооружений.

Облицовка участков каналов, преследующая цель сбережения поливной воды (борьба с фильтрацией), или укрепления русел в местах, где скорость превосходит пределы критических размывающих скоростей для грунта, или наконец, уменьшение поперечных сечений канала за счет уменьшения сопротивления движению воды, является работой дорогой и уточнение расчетных данных есть дело первостепенной важности.

Приводимые в работах результаты исследований Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации хотя и ограничиваются характеристикой коэффициентов шероховатости по данным сравнительно небольшого числа из произведенных исследований, тем не менее, оспещая фактический материал, являются необходимыми для проектирования и строительства.

В предлагаемом сборнике, представляющем первую часть труда о коэффициентах шероховатости, систематизирована большая часть произведенных институтом исследований гидравлических элементов и коэффициентов шероховатостей, наблюдаемых на облицованных участках каналов и в лотках гидротехнических сооружений. Значительная часть отдельных статей основана на материалах полевых исследований на выстроенных в Средней Азии сооружениях—акведук на Джуне, холостая часть магистрального канала Янги-арык, быстроток сброса Дальверзинского канала, дренажные трубы Голодной степи, облицованные участки и ряд быстротоков Янги-даргома.

Кроме случаев нормальной шероховатости, приводятся и результаты полевых исследований быстротока повышенной шероховатости на Янги-даргоме и также и лабораторных исследований модели варианта быстротока повышенной шероховатости для Акгазинского сброса.

Таким образом, в этой (первой) части труда охвачены преимущественно гидротехнические сооружения на каналах Средней Азии.

Вторая часть труда будет заключать в себе сводку произведенных институтом исследований коэффициентов шероховатости в естественных грунтах, их анализ, оценку применяемых формул и общие выводы.

САНИИРИ

Акведук на Джуне, бетонированные участки каналов Янги-даргом и Янги-арык

1. Введение

При ирригационном строительстве в Средней Азии избежать укрепления отдельных участков невозможно. Рельеф местности, слабость сопротивления грунтов размывающей деятельности потока, фильтрующая способность грунтов требуют возведения различного рода гидротехнических сооружений — перепадов, быстроток, акведуков, дамб, струенаправляющих шпор, укрепления отдельных участков канала одеждой более прочным, чем естественный грунт, материалом (камыш, бетон, дерево, хворост, каменная отмостка и др.).

Крепление отдельных участков канала встречается почти на всех ирригационных системах как сооруженных в последнее время, так и в старых каналах, причем армирование последних производилось в порядке улучшения или переустройства орошения.

Подобного рода крепления, кроме других прочих, имеют:

1. Система Янги-арык (Фергана) — бетонированный головной участок канала на протяжении 785 м ($Q_p = 78,9 \text{ м}^3/\text{сек.}$).
2. Канал Мархамат (Фергана) — бетонированный участок у консольного перепада на протяжении 330 м.
3. Учкурганский канал.
4. Канал Янги-даргом (Зеравшанская долина) — участки канала, бетонированные на общем протяжении 7,9 км, и участок с одиночной булыжной отмосткой на протяжении 2,3 км ($Q_p = 125 \text{ м}^3/\text{сек.}$).
5. Канал Дальверзин — бетонированная холостая часть на протяжении ~ 9 км.
6. Канал Савай — бетонированный участок на 1-м километре протяжении ~ 200 км ($Q_p \approx 14,0 \text{ м}^3/\text{сек.}$).

Деревянные облицовки, как таковые, встречаются редко, чаще в виде акведуков, желобов (например, акведук на р. Чу у Кендырного совхоза, деревянный желоб на Джуне длиной ~ 480 м и др.).

Другими словами, в общем масштабе ирригационного строительства крепление участков играют большую роль, а следовательно, и всякое уточнение расчетных оснований.

Настоящая работа преследует узкую задачу ознакомить с данными фактических определений коэффициентов шероховатости, произведенных Среднеазиатским институтом ирригации (прежде ОИИВХ) на системах Средней Азии, в частности на упомянутых выше каналах Янги-арык, Янги-даргом (бетонированные участки) и на Джунском акведуке.

Сводная таблица № 1

Район Ферганский 1929 г.

гидравлических элементов по участку в бетонном русле канала Янги-арык.

№№ по пор.	Дата	Гори- зонт во- ды (в мет.)	Q	ω	B	Z	H	R	V _{ср}	V _н	V _н	I	L	n ₁	C	γ	n	n ₂
1	28/VI	482,397	30,0	11,7	10,5	11,5	1,11	1,02	2,56	2,63	2,50	0,00171	100,7	0,0147	68,43	0,27	0,0147	0,0147
2	30/VI	« 327	25,9	10,6	10,2	11,2	1,01	0,943	2,44	2,44	2,40	0,00142	*	0,0144	69,04	0,25	0,0144	0,0143
3	6/VII	« 407	30,0	11,4	10,4	11,4	1,10	1,00	2,63	2,68	2,56	0,00167	*	0,0140	71,53	0,22	0,0140	0,0140
4	8/VII	« 507	32,9	12,3	10,6	11,7	1,16	1,05	2,67	2,72	2,59	0,00167	*	0,0140	72,03	0,21	0,0140	0,0140
5	9/VII	« 567	34,6	13,1	10,8	11,8	1,21	1,11	2,64	2,66	2,60	0,00144	*	0,0145	70,21	0,25	0,0144	0,0145
6	6/VIII	« 427	30,1	11,9	10,5	11,6	1,13	1,03	2,53	2,57	2,47	0,00159	*	0,0147	68,55	0,27	0,0146	0,0147
7	7/VIII	« 437	30,6	11,8	10,5	11,5	1,12	1,03	2,59	2,64	2,55	0,00153	*	0,0141	71,31	0,22	0,0141	0,0141
8	9/VIII	« 417	30,3	11,4	10,4	11,4	1,10	1,00	2,66	2,71	2,59	0,00158	*	0,0133	74,99	0,16	0,0133	0,0133
9	10/VIII	« 437	31,0	11,7	10,4	11,5	1,12	1,02	2,65	2,72	2,58	0,00171	*	0,0140	71,84	0,21	0,0140	0,0140
10	11/VIII	« 367	28,2	11,4	10,4	11,4	1,10	1,00	2,47	2,52	2,41	0,00166	*	0,0151	66,34	0,31	0,0151	0,0151
11	12/VIII	« 407	29,6	11,6	10,4	11,5	1,12	1,01	2,55	2,57	2,51	0,00150	*	0,0144	69,59	0,25	0,0144	0,0144
12	13/VIII	« 387	28,9	11,6	10,4	11,5	1,12	1,01	2,49	2,51	2,41	0,00164	*	0,0150	66,76	0,30	0,0150	0,0150
13	14/VIII	« 397	29,2	11,7	10,5	11,5	1,11	1,02	2,50	2,54	2,45	0,00151	*	0,0145	69,14	0,26	0,0145	0,0145
14	26/VIII	« 517	33,4	12,9	10,7	11,8	1,21	1,09	2,59	2,61	2,51	0,00158	*	0,0148	68,54	0,28	0,0147	0,0148
15	27/VIII	« 547	34,4	13,3	10,8	11,9	1,23	1,12	2,59	2,65	2,51	0,00173	—	0,0154	66,14	0,34	0,0154	0,0154
16	28/VIII	« 517	33,4	12,9	10,7	11,8	1,21	1,09	2,59	2,61	2,49	0,00179	*	0,0157	64,73	0,35	0,0156	0,0157
17	30/VIII	« 537	34,1	13,2	10,8	11,9	1,22	1,11	2,58	2,58	2,53	0,00146	*	0,0151	67,35	0,30	0,0150	0,0151
18	31/VIII	« 497	32,7	12,8	10,7	11,8	1,20	1,08	2,55	2,57	2,48	0,00161	*	0,0153	65,99	0,33	0,0153	0,0153
19	6/IX	« 427	30,3	12,2	10,6	11,6	1,15	1,05	2,48	2,46	2,39	0,00155	*	0,0154	65,59	0,34	0,0153	0,0154

n — коэффициент по Гагиле-Куттеру.

n₁ — « по Маннингу;n₂ — « по Павловскому; γ — « по Базену.

Сводная таблица № 2

расходов мутности канала Инги-арык на участке в бетонном русле в 1921 г.

№№ по пор.	Дата	Горизонт воды (в м)	Расход взвешенных наносов (мутности) в кг/сек.					Относительная мутность							
			по фракциям			Общий	в кг/м³			в процент. от общей					
			по фракциям				по фракциям			по фракциям			Общая		
			I	II	III		I	II	III	I	II	III			
				>0,25 мм	от 0,25 до 0,05 мм	<0,05 мм		>0,25 мм	от 0,25 до 0,05 мм	<0,05 мм		>0,25 мм	от 0,25 до 0,05 мм	<0,05 мм	
1	28/VI	482,397	30,0	0,07	3,13	15,8	19,0	0,002	0,104	0,527	0,633	0,32	16,43	83,25	100,0
2	29/VI	482,177	21,3	0,16	1,21	8,83	10,2	0,001	0,057	0,415	0,479	1,05	11,90	86,64	100,0
3	30/VI	482,327	25,9	0	2,00	11,6	13,6	0	0,077	0,448	0,525	0	11,67	85,33	100,0
4	1/VII	481,967	14,1	0	1,87	6,00	7,87	0	0,132	0,426	0,558	0	23,66	76,34	100,0
5	2/VII	482,357	27,7	0,13	3,07	14,6	17,8	0,004	0,111	0,527	0,642	0,62	17,29	82,09	100,0
6	6/VII	482,407	30,0	2,35	4,05	59,8	66,2	0,079	0,135	1,993	2,207	3,58	6,12	90,30	100,0
7	8/VII	482,507	32,9	0	2,70	27,0	29,7	0	0,082	0,321	0,903	0	9,08	90,92	100,0
8	10/VII	482,277	24,6	0,46	3,00	20,0	23,4	0,035	0,122	0,813	0,951	1,68	12,83	85,49	100,0
9	12/VII	482,427	30,6	1,70	4,50	39,3	45,5	0,056	0,147	1,284	0,487	3,76	9,89	86,35	100,0
10	14/VII	481,837	11,1	0	1,80	13,2	15,0	0	0,163	1,189	1,352	0	12,06	87,94	100,0
	Среднее	482,271	24,8	0,47	2,73	21,6	24,8	0,019	0,110	0,871	1,10	1,90	11,00	87,10	100,0

Сводная таблица №3
гидравлических элементов канала Янги-даргом (Рават-ходжа)

№№ п/п	Наименование участка	Дата	Горизонт воды (н.м.)	Q	ω	B	χ	H	R	$v_{ср}$	$v_{н}$	$v_{в}$	I	l	C	γ	n	n_1	n_2
1930 год																			
1	Уч. №3	16/IX	840,908	22,8	10,2	8,80	9,80	1,16	1,01	2,21	2,11	2,26	0,000862	500,0	72,0	0,21	0,014	0,0140	0,0140
2	"	19/IX	,870	21,8	9,96	8,69	9,68	1,15	1,03	2,19	2,06	2,20	0,000866	"	70,6	0,27	0,014	0,0142	0,0142
3	"	21/IX	,813	20,6	9,64	8,60	9,56	1,12	1,01	2,14	2,02	2,13	0,000894	"	69,7	0,25	0,014	0,0146	0,0144
4	"	22/IX	,708	19,1	8,87	8,32	9,22	1,07	0,96	2,15	2,03	2,16	0,000872	"	72,1	0,21	0,014	0,0138	0,0138
5	"	23/IX	,689	17,6	8,45	8,16	9,01	1,04	0,93	2,08	1,97	2,07	0,000903	"	70,3	0,23	0,015	0,0140	0,0140
6	"	26/IX	,434	12,8	6,44	7,40	8,12	0,87	0,79	2,00	1,85	1,96	0,000904	"	73,0	0,17	0,015	0,0132	0,0131
7	"	27/IX	,429	12,6	6,41	7,40	8,12	0,87	0,79	1,96	1,97	1,96	0,000892	"	74,0	0,16	0,015	0,030	0,0131
1931 год																			
1	"	31/VII	841,698	52,4	18,9	11,3	12,8	1,67	1,48	2,77	2,79	2,79	0,000928	500,0	72,5	0,24	0,0145	0,0147	0,0142
2	"	31/VIII	841,654	51,6	18,8	11,2	12,6	1,68	1,49	2,74	2,67	2,76	0,000890	"	73,3	0,23	0,0143	0,0146	0,0141
3	"	15/IX	,268	36,3	14,3	10,0	11,4	1,43	1,25	2,54	2,42	2,50	0,000938	"	72,6	0,22	0,0142	0,0143	0,0140
4	"	21/IX	840,997	26,1	11,7	9,27	10,3	1,26	1,14	2,26	2,13	2,26	0,000890	"	68,5	0,29	0,0149	0,0149	0,0147
5	"	27/IX	840,889	26,4	10,7	8,94	9,91	1,20	1,08	2,47	2,30	2,47	0,000896	"	76,7	0,14	0,0131	0,0132	0,0131

Сводная таблица № 4

гидравлических элементов по каналу Н. Дюв (деревянный желоб) участок № 2, 1929 г.

№№ рас- ходов	Д а т а	Горизонт воды среднего уча- стка (в м)	Q	ω	B	Z	H	R	v_{cp}	I	L	C	γ	n	n_1	n_2
3	23/VIII	350,888	2,30	0,86	2,00	2,86	0,43	0,301	2,674	0,005987	22,18	63,2	0,206	0,0132	0,0129	0,0132
4	24/VIII	350,912	2,37	0,87	—	2,89	0,44	0,301	2,724	0,006861	—	64,8	0,197	0,0130	0,0126	0,0130
5	24/VIII	350,953	2,55	0,93	—	2,94	0,46	0,316	2,742	0,005591	—	65,3	0,187	0,0129	0,0126	0,0129
7	24/VIII	350,963	2,58	0,93	—	2,94	0,46	0,316	2,774	0,005110	—	67,0	0,167	0,0127	0,0123	0,0127

II. Методы исследования и обработки материалов

Определение коэффициентов шероховатости на перечисленных выше участках как в полевой, так и в камеральной своей части, производилось в соответствии с инструкциями Института¹. Кратко методика исследования заключалась в следующих основных положениях:

1. При каждом определении коэффициента непосредственными измерениями и наблюдениями устанавливались величины всех гидравлических элементов, входящих в общепринятые формулы, определяющие коэффициент C в формуле Шези.

$$v_{cp} = C \sqrt{Ri} \dots \dots \dots (1)$$

а именно: v_{cp} — скорость потока, определяемая как $\frac{Q}{\omega}$

R — гидравлический радиус $\frac{\omega}{\chi}$;

χ — смоченный периметр;

ω — площадь живого сечения;

i — уклон воды.

2. Указанные гидравлические величины определялись в среднем их значении для некоторого участка исследования.

3. На каждом участке определение коэффициента производилось несколько раз как с целью проверки получаемых данных, так и для установления изменения коэффициентов шероховатости под влиянием изменения гидравлических величин (другими словами, определение производилось при равных расходах воды).

4. Участки наблюдения выбирались с таким расчетом, чтобы по своему плановому очертанию и поперечным сечениям удовлетворяли по возможности условиям образования равномерного движения воды — были бы прямолинейны, с постоянным сечением и не находились бы в сфере влияния подпора или спада (описание участков дается ниже).

Предварительные общие работы и работы по каждому отдельному определению проводились следующими способами и в нижеследующем порядке.

Опытные участки в плановом отношении закреплялись на местности магистралью, разбитой по возможности параллельно струям, в высотном отношении реперами, имеющими абсолютные или относительные отметки в зависимости от местных условий.

Для получения средних гидравлических элементов живого сечения участка для каждого опыта, на участке разбивались поперечники нормально к направлению течения струй. Число и расстояние между последними зависело от длины участка и правильности сечения канала. Поперечники привязывались к магистрали.

Полный цикл работ одного наблюдения по определению коэффициента шероховатости включал в себе следующие работы:

1. Нивелировку поперечников с помощью промерной рейки Отта.

2. Измерение скоростей воды на рабочем створе, совмещаемом обычно с одним из поперечников. Измерение скоростей производилось вертушкой Отта или вертушкой ИВХ тип Прайса со штанги. Скорости измерялись на отдельных вертикалях (5—8 вертикалей по сечению) на каждой в 5 или 6 точках (у поверхности; на 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 глубины от поверхности и у дна; при 5-точечном методе скорости не из-

¹ См. „Инструкции для производства полевых работ и обработки материалов при гидравлических исследованиях на ирригационных каналах“. Инж. Ярдов издание САНИИРИ, 1933 г.,

мерялись на 0,4 h) с продолжительностью наблюдения в точке от 2 до 6 мин.

3. Нивелировку горизонтов воды до и после измерения скоростей на каждом поперечнике на урезах обоих берегов—для определения уклона воды и площадей живых сечений¹.

4. Наблюдение за колебанием горизонта воды по рейке у рабочего створа для контроля за режимом потока на участке.

Весь цикл работ каждого измерения проводился в один рабочий день в условиях почти постоянного уровня воды и при постоянном расходе.

Обработка материалов заключалась в вычислении по общепринятым формулам для каждого опыта величины коэффициента шероховатости:

1. По формуле Базена

$$\gamma = \left(\frac{87}{C} - 1 \right) \sqrt{R} \dots \dots \dots (2)$$

2. По формуле Гангилье-Куттера

$$n = \frac{-(C-K) + \sqrt{(C-K)^2 + \frac{4CK}{\sqrt{R}}}}{2 \frac{CK}{\sqrt{R}}} \dots \dots \dots (3)$$

3. По формуле Маннинга

$$n_1 = \frac{1}{C} R^{\frac{1}{6}} \dots \dots \dots (4)$$

4. По формуле Павловского²

$$n_2 = \frac{1}{C} R^y$$

где γ , n , n_1 , n_2 — соответствующие коэффициенты шероховатости,

C — коэффициент в формуле Шези $\left(C = \frac{v_{cp}}{\sqrt{RI}} \right)$

y — показатель в формуле Павловского, принятый при вычислении равным $2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,10)$

Величины v_{cp} , R и I определялись по данным полевым измерениям

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega}$$

где Q — измеренный расход воды,

ω — средняя площадь живого сечения участка = $\frac{\sum \omega}{n}$ (n — число поперечников);

$$R = \frac{\omega}{L}$$

где ω — средняя площадь живого сечения;

L — средний смоченный периметр всего участка = $\frac{\sum L}{n}$

I — средний уклон воды = $i = \frac{v_n^2 - v_b^2}{2gL}$, где i — средний поверх-

ностный уклон, а $\frac{v_n^2 - v_b^2}{2gL}$ — поправка на неравномерность (v_n и v_b —

¹ На участке Янги-арыка, при некоторых определениях брались пробы взвешенных наносов.

² Коэффициент n_2 по формуле Павловского определяется графически.

средние скорости в конце и в начале участка, g — ускорение силы тяжести, а L — длина участка).

Расход воды определялся графо-механическим способом проф. Герляхера, отличающимся наибольшей точностью вычисления, поперечный уклон воды принимался равным отношению $\frac{H_v - H_n}{L}$, где H — средний горизонт воды у берегов на верхнем и нижнем створах.

III. Результат исследований.

а) Канал Яни-арык.

Участок исследования прямолинейный, длиной 100,7 м. Ширина канала по дну 8 м, заложение откосов 1:1 (поперечное сечение см. рис. 1), дно и откосы покрыты бетонной облицовкой без штукатурки с температурными швами (вертикальными) примерно через 2 м.

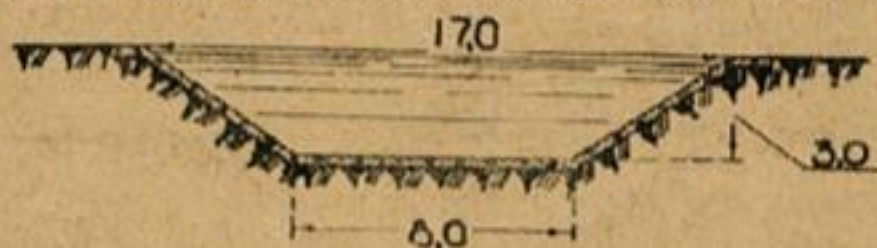


Рис. 1

На 335 м выше участка имеется плавное закругление (рис. 1) с радиусом ≈ 120 м. На 287 м ниже участка бетонная облицовка сменяется на мостовую.

Наблюдения охватывают период с 28.VI по 6.IX 1929 г. За этот срок было произведено 19 определений коэффициентов шероховатости при незначительном изменении расходов, скоростей и других элементов ($Q_{\max} = 34,6 \text{ м}^3/\text{сек.}$, $Q_{\min} = 25,9 \text{ м}^3/\text{сек.}$, $v_{\text{ср. max}} = 2,66 \text{ м/сек.}$, $v_{\text{ср. min}} = 2,44 \text{ м/сек.}$)

За период с 28.VI по 14.VII на этом же участке было произведено 10 определений расхода взвешенных наносов, достаточно характеризующих их количество и состав на участке (некоторые расходы не совпадают по времени с определением коэффициента шероховатости).

Движения донных наносов не было.

Результаты наблюдений сведены в таблицах 1 и 2, где даются все гидравлические величины потока, наблюдавшиеся при производстве каждого опыта и вычисленные коэффициенты по трем вышеприведенным формулам.

По данным таблицы 1 имеем коэффициенты, величина которых колеблется для n , n_1 и n_2 в пределах от 0,0133 до 0,0157 при среднем значении по всей серии опытов — 0,0147 и для γ в пределах от 0,16 до 0,35 при среднем $\gamma = 0,27$.

Средние относительные квадратические отклонения вычисленные по формуле

$$\sigma\% = \frac{\pm \sqrt{\frac{\sum (\sigma)^2}{n}}}{x} \cdot 100 \dots \dots \dots (5)$$

составляют для n_1 — $\pm 4,1\%$
 n и n_2 — $\pm 4,0\%$
 γ — $\pm 18,7\%$

Наибольшее отклонение от средних значений дают коэффициенты, определенные измерением 9.VIII, при исключении их из числа опытов на основании предположения возможной ошибки при полевых наблюдениях те же квадратичные отклонения будут

$$\text{для } p_1 = 3,5\%$$

$$p \text{ и } p_2 = 3,4\%$$

$$\gamma = 16,7\%$$

б) Канал Янги-даргом

Участок исследования расположен на 6,3 км ниже головного сооружения Янги-даргом, участок длиной 500 м, прямоугольный, ширина дна 4 м, откосы 1:1,5. Дно и откосы бетонированы (рис. 2). Бетонировка велась при помощи цемент-пушки и поверхность облицовки имеет вид грубой штукатурки. Температурные швы вертикальные через 5 м, горизонты и месте сопряжения откосов с дном, швы заделаны деревянными рейками, обернутыми толстым. Признаков водорослей нет, в швах, обычно выше горизонта воды, наблюдается прорастание травы (колючки „Янтаг“ и вьюнка).

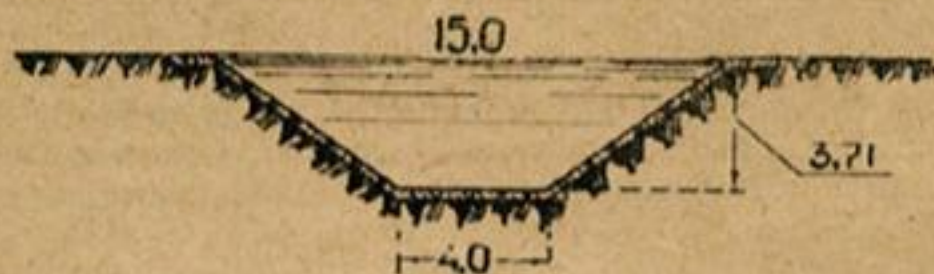


Рис. 2

На 200 м выше участка имеется закругление с большим радиусом ($R=640$), ниже канал прямолинейный.

На 200 м выше участка имеется четырехступенчатый перепад, на 800 м ниже одноступенчатый перепад.

Движения донных наносов во время производства работ не было. Взвешенные наносы не наблюдались.

Определение коэффициентов шероховатости производилось в 1930 г. с 16. IX по 27. IX (7 определений) и в 1931 г. с 31. VII по 27. IX (5 определений). Опытами охвачены расходы воды от 12,6 м³/сек. до 52,4 м³/сек. при скоростях от 1,96 м/сек до 2,77 м/сек.

Результаты наблюдения сведены в таблице 3, из которой видно, что по отдельным определениям коэффициенты колебались в пределах для p от 0,0131 до 0,015 при среднем значении $=0,0143$; для p_1 от 0,0130 до 0,0149 при среднем $=0,0140$; для p_2 от 0,0130 до 0,0149 (среднее $=0,0140$) и для γ от 0,14 до 0,29 при среднем значении равно $=0,21$.

Среднее относительное квадратичное отклонение, определенное по формуле (5) составляет:

$$\text{для } p = \pm 3,9\%$$

$$p_1 = \pm 4,4 \%$$

$$p_2 = \pm 4,1 \%$$

$$\gamma = \pm 20,6 \%$$

в) Джунский деревянный акведук

Деревянный акведук на канале Джун расположен у села Садового на 20 м ниже перегораживающего сооружения пикета 95+7, где канал пересекает широкий довольно пологий лог. Общая длина лотка 480 м, лоток имеет постоянное прямоугольное сечение, шириной по дну 2 м и высотой стенок 2 м. Стенки и дно лотка построены из досок, уло-

женных вдоль лотка, щели прокопачены, а вся внутренняя поверхность дна и боковых бортов осмолена (см. рис. 3).

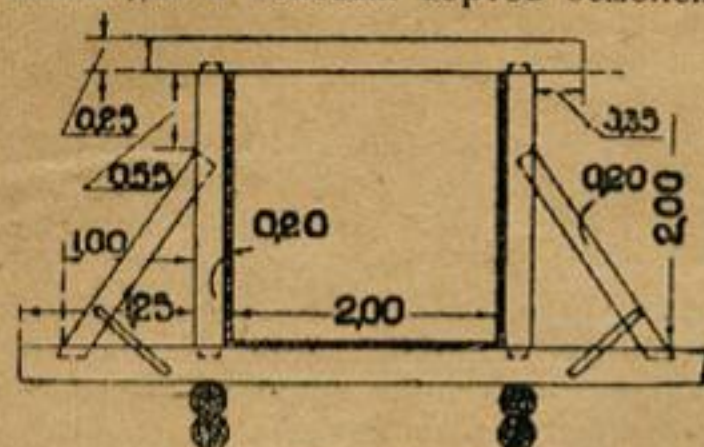


Рис. 3

Коэффициенты шероховатости определены для участка длиной 22,18 м, гидравлические элементы сечения определялись по 7 поперечникам. Наблюдения произведены в течение двух дней 23 и 24/VIII 1929 г. почти при постоянных расходах воды (Q м³/сек. от 2,30 до 2,58), при средней глубине наполнения 0,45 м¹.

Учет взвешенных наносов во время опыта не производился, по данным же других наблюдений на каналах системы Джуна, взвешенные наносы Джуна состояли главным образом из мельчайших фракций ($< 0,05$ мм более 90%). Движения донных наносов по желобу во всяком случае не происходило.

Результаты наблюдения представлены в таблице 4, в которой усматривается, что величины определенных коэффициентов по отдельным наблюдениям колеблются для γ от 0,21 до 0,17, для n и n_2 от 0,0127 до 0,0132 и для n_1 от 0,0123 до 0,0129. Среднее значение коэффициентов получено

$$\gamma = 0,19;$$

$$n \text{ и } n_2 = 0,0129;$$

$$n_1 = 0,126$$

Квадратичное среднее отклонение значений коэффициентов составляет для

$$\gamma = \pm 7,7\%$$

$$n \text{ и } n_2 = \pm 1,6 \%$$

$$n_1 = \pm 1,7 \%$$

IV. Выводы

Как известно, величина коэффициента шероховатости зависит от степени шероховатости ложа и при неизменной шероховатости независимо от других гидравлических элементов потока и сечения должна бы быть величиной постоянной. Замечаемые при опытах отклонения коэффициентов отдельных определений на одном и том же участке не могут быть, однако, отнесены за счет только неточности полевых измерений, — несомненно здесь влияет и несовершенство отдельных формул, не учитывающих или недостаточно точно учитывающих некоторые явления.

При других аналогичных опытах института установлено, что с изменением расхода воды ² обычно наблюдается и изменение коэффициентов; это отчасти замечается и в приводимых здесь результатах, особенно по участку Янги-даргома, где наблюдениями охвачена большая амплитуда колебания расходов воды.

¹ Охватить наблюдениями расходы с большими колебаниями не представилось возможным по эксплуатационным условиям.

² Говоря о том, что коэффициент шероховатости является некоторой функцией от Q , следует под расходом понимать величину, являющуюся со своей стороны сложной функцией v , R , i , h и т. д.

В задачу настоящей статьи не входит установление закономерности подобных изменений, или подробного анализа формулы, да и при ограничении приведенного материала это было бы бесполезно.

Значение средних квадратических отклонений для каждой формулы различно; другими словами, если допустить одинаковую относительную ошибку в коэффициентах шероховатости, то ошибки в определении скоростей течения (или C) по разным формулам будут отличаться друг от друга; так, если при определении γ допускается относительная ошибка α , то ошибка в определении C (назовем β) будет равна

$$\pm \beta = \frac{1}{\sqrt{R + \gamma}} \cdot \frac{\sqrt{R + \gamma(1 \pm \alpha)}}{\sqrt{R + \gamma}}$$

откуда

$$\pm \beta = \frac{\sqrt{R + \gamma}}{\sqrt{R + \gamma(1 \pm \alpha)}} - 1 = \pm \frac{\alpha}{\sqrt{R + \gamma(1 \pm \alpha)}} \dots \dots \dots (6)$$

т. е. зависит не только от α , но и от гидравлического радиуса и от величины самой γ , при чем β всегда будет меньше α и тем меньше, чем меньше абсолютное значение γ и чем больше величина R .

Относительная ошибка β в определении C по формуле Маннинга будет равна

$$\pm \beta = \pm \frac{\alpha}{1 \pm \alpha} \dots \dots \dots (7)$$

т. е. всегда будет довольно близка к α .

Зависимость ошибки β по формуле Гангиле-Куттера весьма сложна и выражается общим уравнением

$$\pm \beta = \frac{(Kn + 1) [\sqrt{R + Kn(1 \pm \alpha)}] (1 \pm \alpha)}{(\sqrt{R + Kn}) [Kn(1 \pm \alpha) + 1]} - 1 \dots \dots \dots (8)$$

показывающим, что ошибка β в определении C зависит не только от α , но и от уклона i (i входит в выражение K), от гидравлического радиуса R и от коэффициента шероховатости n .

Для наших частных случаев средние относительные ошибки в определении $v_{\text{ср}}$ при средних гидравлических величинах получены следующих порядков (предполагая, что возможная ошибка в определениях коэффициентов шероховатостей равна средней квадратической ошибке):

Наименование участков	Средняя квадратическая ошибка в процентах			Ошибка в определении C и $v_{\text{ср}}$		
	γ	n	n_1	По Ба- ззну	По Га- гль- Куттеру	По Ман- нингу
Канал Янги-арык . . .	16,7	3,4	3,5	3,3	3,2	3,4
« Янги-дартем . . .	20,6	3,9	4,4	3,3	3,8	4,2
« Джуи	7,7	1,6	1,7	1,9	1,6	1,7

Эти данные вполне устанавливают как достаточную точность произведенных полевых определений, так и практическую равноценность коэффициентов, определенных по трем наиболее распространенным в практике формулам.

При сопоставлении полученных данных по коэффициентам шероховатости (их средние значения) с данными существующих таблиц, можно сделать вывод, что фактически наблюдаемые коэффициенты несколько расходятся со стандартными величинами по справочным таблицам. Это усматривается из приводимой ниже таблицы.

№	О п и с а н и е	Коэффициенты шероховатости	
		γ	μ
I. Справочные данные:			
1	Очень гладкие стенки (цементная штукатурка, строганные доски)	0,06	0,010
2	Гладкие стенки (доски, кирпичи, ровная забетонированная поверхность)	0,16	0,012
3	Бутовая чистая кладка, бетонировка средней шероховатости	0,46	0,013
4	Весьма грубая бетонировка	0,86	0,017
II. По опытам САННИИ			
1	Бетонная облицовка с грубой штукатуркой (средняя шероховатость)	0,21	0,015
2	То же без штукатурки	0,27	0,014
3	Стенки из нестроганных просмоленных досок	0,19	0,013

Шероховатость дренажных гончарных труб

(Участок в Золотой орде Голодной степи).

§ 1. Коэффициенты шероховатости для открытых русел, открытых как с точки зрения гидравлической (т. е. ненпорных), так и с точки зрения легкости наблюдения в них при свободном к ним доступе, подсчитываются сравнительно легко по полученным из наблюдений данным.

Для этого необходимо соблюдение ряда условий при производстве наблюдений, а именно: прямолинейность участка, постоянство на его длине поперечного сечения, постоянство расхода и уклона, т. е. условий, удовлетворяющих равномерному режиму потока; при этом постоянство расхода может быть сравнительно легко проверено измерением расхода воды по двум створам — в начале и конце участка, что даст уверенность в отсутствии значительных потерь (на фильтрацию и др.) на этом участке и притока (например, подпитывание грунтовыми водами).

Значительно сложнее исследовать потери на трение в потоке, наблюдение за которым осложнено. Материалы наблюдений в таких случаях обычно получают с большими затруднениями и не всегда могут полностью удовлетворить требованиям для подсчетов коэффициента шероховатости.

К таким должен быть отнесен и материал наблюдений, произведенных в Голодной степи над дренажной системой опытного участка в Золотой орде,¹ полученный в связи с изучением режима грунтовых вод.

Обширные лабораторные исследования² дренажных труб, произведенные в Америке, касались вопроса о влиянии диаметра трубы, уклона, способа укладки и материала трубы на коэффициент шероховатости. Опыты эти были, однако, поставлены таким образом, что трубы по существу не являлись дренажными, ибо укладывались в лотке и, хотя и были засыпаны грунтом, но вода в них подавалась насосом и начальное звено и пропускалась по всей длине ее неизменным расходом.

Фактически дренажные трубы имеют переменный, постоянно увеличивающийся расход, так как через каждый стык труб поступает грунтовая вода. Гидравлика для этого случая считает потери иными, чем при постоянном расходе, следовательно, и коэффициент шероховатости, вообще говоря, должен быть различен.

Движение в дренажных трубах относится к движению неравномерному. Обычно дренажные трубы рассчитываются все же по формулам равномерного режима. При этом в формуле Шези

$$v = C \sqrt{R i}$$

¹ Нижеприведенные данные наблюдений переданы автору инж. Н. В. Маркидиным. Подсчеты коэффициентов шероховатости для сокращенной формулы Гангильс-Куттера сделаны по его же просьбе.

² Описанные в работе, опубликованной в № 854 за 1929 г. см. Bul. United States Department of agriculture by Jarnell and Woodworth.

значение коэффициента Шези C часто рекомендуется брать по формуле Базена

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\tau}{VR}}$$

с коэффициентом шероховатости

$\tau = 0,20$, или по формуле Куттера¹

$$C = \frac{100}{1 + \frac{K}{VR}}$$

с коэффициентом шероховатости

$$K = 0,27$$

При этом трубы считаются безнапорными, хотя и полностью заполненными. Для хорошей укладки труб, в сокращенной формуле Гангилье-Куттера

$$C = \frac{1}{1 + \frac{23 + \frac{1}{n}}{VR}}$$

по Шпетле вводится $n = 0,0125$.

§ 2. Дренажная сеть опытного участка в Золотой орде Голодной степи представляет собой сеть дренажных гончарных труб. Сбор подземной воды начинают собирательные дрены, группируемые затем в коллектора. В месте приключения собирателя к коллектору устроен колодец с измерительным водосливом для измерения расхода воды в конце собирателя.

По длине собирателя устроено несколько вертикальных смотровых шахт. Таким образом, имеется возможность наблюдать как расход воды в конце собирателя, так и уровень воды в смотровых вертикальных шахтах. Эти наблюдения и производятся систематически в продолжение значительного периода времени, с некоторыми перерывами.

На рис. 1 (показан схематический продольный разрез по собирателю).

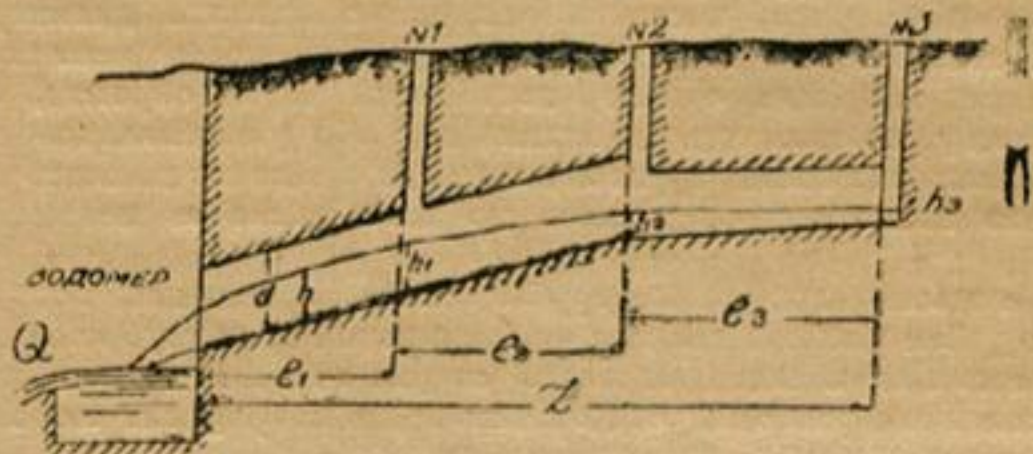


Рис. 1

Помимо этих наблюдений, в некоторых случаях наблюдалась скорость течения воды в дрене при помощи пропускания краски. Таким образом, получен некоторый материал, позволяющий подсчитать коэффициент шероховатости дренажных гончарных труб в условиях практи-

¹ См., например, проф. Шпетле «Осушение почвы подземным дренажем» и переводе с немецкого с немецкими и дополнениями А. Д. Дубач, изд. 1926 г. М—Д; Бахметьев Б. А. «Равномерное движение в каналах и трубах», изд. 1931 г.; Тромбачев С. П. «Орошение и осушение», изд. 1932 г.

ческой их работы. Однако, материалы наблюдений не позволяют подсчитать коэффициент шероховатости при работе труб полным сечением, так как в этих случаях водосливы оказывались затопленными и измерений расходов не производилось.

Поэтому используются материалы наблюдений при меньших расходах воды в собирателях, когда сечение трубы работает не полностью.

Движение соответствует условиям неравномерного установившегося режима (в течение ряда суток). По всей длине через соответствующие зазоры между звеньями труб, частично прикрытыми сверху во избежание засорения, грунтовая вода проникает в собиратель (или коллектор). Глубина (заполнение) все время увеличивается по мере приближения к выходу, при чем перед самым выходом возможно предположить некоторый спад, убывание глубин.

Общее решение задачи следовало бы делать по уравнениям неравномерного режима, однако, материалов наблюдений для этого недостаточно и, чтобы сделать определения коэффициентов шероховатости, приходится прибегнуть к следующим допущениям.

1. Укладка отдельных звеньев труб по собирателю произведена более или менее одинаково. Уклон дна не изменился за период от укладки труб до времени наблюдений. Шероховатость по длине собирателя одинакова.

2. Приток (поступление) грунтовой воды по длине собирателя постоянен и равен расходу в конце собирателя, деленному на длину его.

3. Участок с постоянно увеличивающейся глубиной плавно сопрягается с участком спада. Здесь поверхность воды параллельна дну. В этом месте движение близко к условиям равномерного режима.

На основании принятых допущений подсчитываем коэффициент шероховатости, при чем делаем два подсчета: *первый* в предположении, что участку равномерного режима соответствует глубина h_1 (измеренная в колодце № 1) и расход Q (в конце собирателя); *второй*, что той же глубине h_1 соответствует расход в конце собирателя, уменьшенный на приток на участке от колодца № 1 до конца собирателя. Так как приток по длине принят равномерным и равным $q = \frac{Q}{L}$, то приток на участке l_1 будет

$$\frac{Q}{L} \cdot l_1 = q l_1$$

а расход у колодца (шахты) № 1 будет

$$Q_1 = \frac{Q}{L} (L - l_1)$$

Второй подсчет должен дать более близкие к действительным значения коэффициента шероховатости.

Подсчеты ведем для нескольких наполнений. Значения наполнений (глубин), а также расходов в расчет вводим средними из ряда наблюдений за период, при чем глубины и расходы за этот период должны быть почти постоянными (условие установившегося движения).

Кроме того, дрены не должны быть заваленными. Естественно, если в дрене имеется слой ила, то разность отметок горизонта воды и дна трубы даст не глубину воды, но одновременно и толщину слоя ила (замеры производились от дна трубы до горизонта воды).

Для равномерного режима из формулы Шези

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{R i}$$

имеем

$$C = \frac{Q}{\omega \cdot \sqrt{R i}}$$

с другой стороны, по Гангилье-Куттеру имеем (сокращенная формула)¹

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{23}{\sqrt{R}}}$$

Приравнивая одно выражение другому, получаем уравнение

$$23 C n^2 + (C - 23) \sqrt{R} \cdot n - \sqrt{R} = 0$$

где n — коэффициент шероховатости.

Отсюда

$$n = -\frac{(C-23)\sqrt{R}}{2 \cdot 23 \cdot C} + \sqrt{\frac{(C-23)^2 R}{40^2 \cdot C^2} + \frac{\sqrt{R}}{23C}} \dots \dots \dots (A)$$

§ 3. Нами произведены подсчеты значений коэффициента шероховатости для двух собирателей № 6 и № 7.

Собиратель № 6 проходит в более плотном грунте, вблизи Шурузьянского водосбора. Собиратель № 7 проложен дальше от Шур-узяка, в более слабом грунте.

В этом отношении, по сообщению Н. В. Макридина, они являются как бы крайними пределами для дренажной сети Золотой орды. Кроме того, трубы собирателя № 6 уложены более тщательно.

Уклоны дна собирателей (к началу работы дренажной сети) и диаметры труб по участкам таковы:

Таблица 1

Участок	Длина участка м	С о б и р а т е л ь			
		№ 7		№ 6	
		Уклон	Диаметр	Уклон	Диаметр
0—1	130	0,0007	151	0,00106	151
1—2	200	0,00110	124	0,00117	124
2—3	200	0,00095	124	0,00061	100

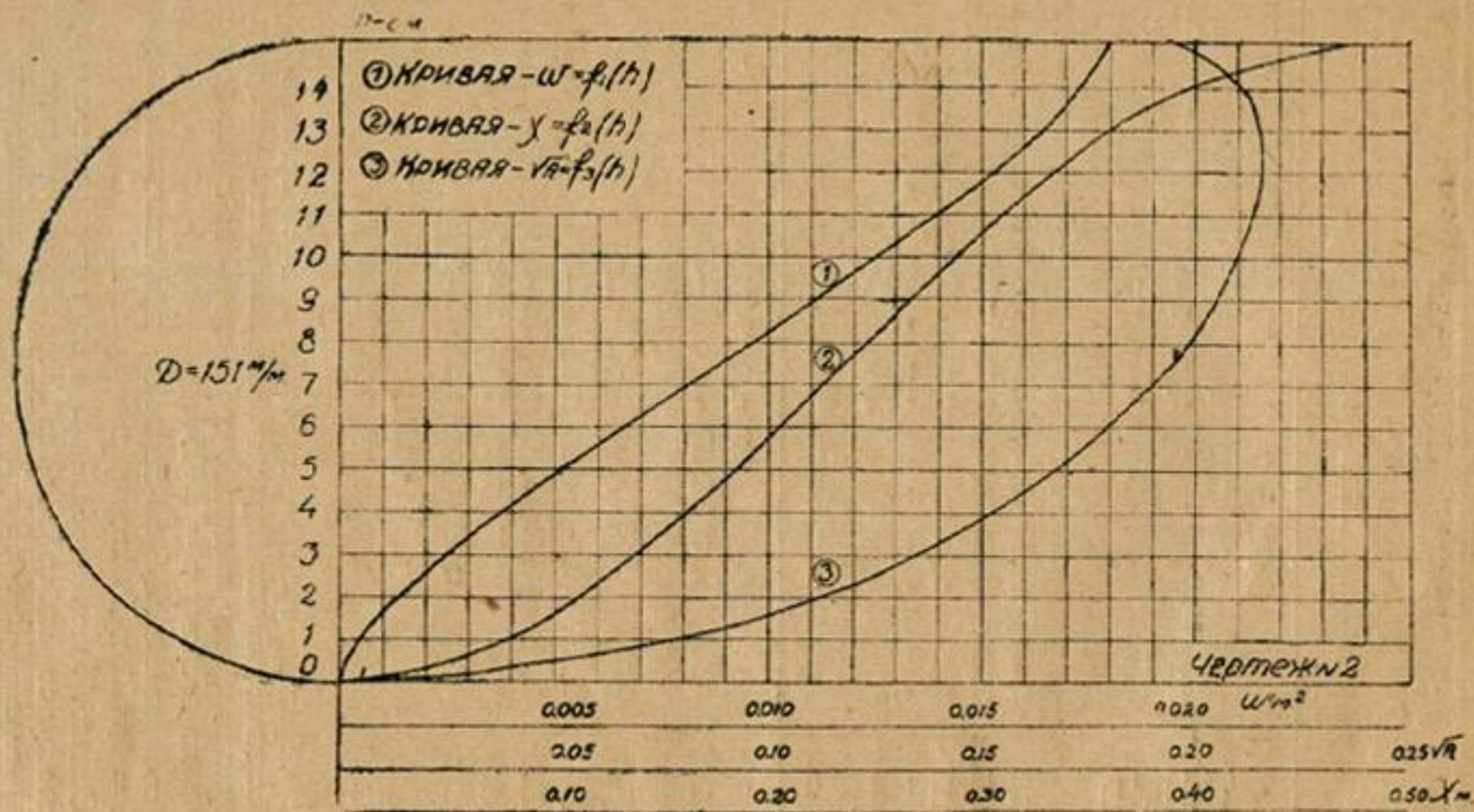
Опытные данные, средние за каждый период наблюдений приведены в таблице 2.

Анализируя данные этой таблицы (№ 2), легко прийти к заключению, что в некоторые периоды работы собирателя № 7 дрена заилена действительно, при одних и тех же глубинах $h_1 \cong 10-11$ см расходы в конце собирателя меняются от $Q \cong 0,7$ л/сек. до $Q \cong 2,3$ л/сек. Это показывает, что периоды 7-8-9 являются периодами заиления дрены, а потому при подсчетах коэффициента шероховатости исключаются, так же как и период 4-й.

Для облегчения подсчета нами построены² вспомогательные графики зависимостей площади живого сечения (ω) и корня квадратного из гидравлического радиуса ($\sqrt{R}$) от наполнения в дрете для диаметра $d = 151$ мм (рис. 2). Все вычисления, сделанные на счетной логарифмической линейке, сведены в таблицу 3; подсчеты сделаны как для первого, так и для второго приближения.

¹ Эта формула принята при составлении проекта сети, при чем коэффициент шероховатости принят $n = 0,0125$.

² При этом использована таблица приведенных гидравлических элементов из курса гидравлики проф. Ф. Е. Максименко.



№№ п. п.	Период наблюдений	Расход в конец со- бирателя Q м/сек	Наполнение в колодцах h см			Число на- блюдений: расход— глубина	Примечание	
			№ 1	№ 2	№ 3			
Соби- ратель № 6			1929 г.				Каждому периоду соот- ветствуют почти посто- янные значения глубин и расходов, т. е. выдер- живается условно уста- новившегося режима. В таблице приведены значения средние по числа наблюдений	
	1	16—31. V	1,815	8,12	7,79	2,32		10—14
	2	2—9. VII	2,282	11,20	10,90	3,80		5—5
	3	29. XI — 1. XII	2,655	12,00	11,00	4,00		4—4
			1930 г.					
	4	5—15. II	2,393	13,00	11,93	4,21		7—8
	5	16—18. II	3,867	13,66	12,66	8,66		3—3
	6	6—18. IV	3,455	13,30	13,64	6,50		8—10
	7	3—31. V	2,070	10,73	11,36	3,78		20—20
8	2—4. X	0,980	10,80	9,50	0	3—3		
9	17—20. X	0,740	10,00	9,50	0	3—3		
Соби- ратель № 7			1929 г.					
	10	1—13. IX	0,651	4,61	2,16	6		12—12
			1930 г.					
	11	1—8. I	1,813	6,50	4,00	0,84		7—5
	12	1—16. II	2,170	6,70	4,30	1,80		11—13
	13	12—13. XI	2,890	8,50	6,50	1,00		2—2
	14	11—17. XI	3,980	9,66	7,20	1,00		3—3
	15	18—21. XI	4,860	11,80	8,70	1,20		3—3
		1931 г.						
16	1—8. I	2,570	7,90	5,80	0,85	6—7		

Таким образом, средние значения для собирателя № 7 из пяти вычисленных значений коэффициента шероховатости (отбрасывая 4, 7, 8, и 9 как периоды явного заиливания собирателя) по первому приближению $n = 0,0165$ и по второму $n = 0,0196$.

Для собирателя № 6 по первому приближению имеем среднее значение $n = 0,0121$ и по второму $n = 0,0149$.

§ 4. Однако, здесь необходимо ввести дополнительную поправку. Имеется несколько наблюдений за скоростями в дренажных трубах обоих собирателей (№ 6 и № 7). Скорости наблюдались следующим образом. В один из колодцев (1-й, 2-й, 3-й, по очереди) впускалась краска. Отмечался момент пуска и затем момент появления краски при выходе из собирателя.

Благодаря этому оказались известными скорости в дрене от 1-го колодца до выхода, от 2-го колодца до выхода и от 3-го колодца до выхода (т. е. по всему собирателю в целом).

Данные наблюдений приведены в следующей таблице (4).

Таблица 3

№ периодов по порядку	№ собирателя	Расход в конце собира-теля	Глубина в первом колодце	Площадь живого сечения	Квадра-тный корень из гидрав-лического радиуса	I-ое приближение		II-ое приближение			Примечание
		Q л/сек	h, см.	"	$\sqrt{R}$	Коэффи-циент Шези	Коэффи-циент шеро-ховатости	Расход воды	Коэффи-циент Шези	Коэффи-циент шеро-ховатости	
						C	n	$Q_1 = Q \left(\frac{L \cdot l_1}{L} \right)$	C	n	
1	7	1,815	8,12	0,0099	0,200	31,3	0,0155	1,37	23,6	0,0191	Уклон дна i = 0,0037 следовательно $\sqrt{i} = 0,0235$
2		2,282	11,20	0,0143	0,214	25,4	0,0188	1,74	19,1	0,0213	
3		2,655	12,00	0,0153	0,215	27,3	0,0179	2,00	20,5	0,0207	
4		2,393	13,00	—	—	—	—	—	—	—	
5		3,887	13,66	0,0139	0,213	36,3	0,0149	2,93	27,5	0,0176	
6		3,455	13,30	0,0167	0,214	32,6	0,0162	2,61	24,8	0,0191	
7		2,070	10,78	—	—	—	—	—	—	—	
8		0,960	10,80	—	—	—	—	—	—	—	
9		0,740	10,00	—	—	—	—	—	—	—	
						Среднее	0,0166		Среднее	0,0196	
10	6	0,651	4,16	0,0040	0,155	33,1	0,0132	0,49	25,0	0,0182	Уклон дна i = 0,001 следовательно $\sqrt{i} = 0,0316$
11		1,813	6,50	0,0075	0,185	41,2	0,0122	1,37	31,3	0,0149	
12		2,170	6,70	0,0078	0,187	47,0	0,0116	1,64	35,5	0,0138	
13		2,890	8,50	0,0104	0,202	43,3	0,0123	2,18	32,7	0,0151	
14		3,980	9,66	0,0121	0,208	50,0	0,0117	3,00	37,7	0,0138	
15		4,860	11,80	0,0150	0,215	47,6	0,0118	3,66	36,1	0,0145	
16		2,570	7,90	0,0095	0,197	43,6	0,0121	1,94	33,0	0,0149	
						Среднее	0,0121		Среднее	0,0148	

Таблица 4

Соби- ратель №	Дата	Скорость v м/сек.			Расход		Глубина h см		
		3—0	2—0	1—0	Q	Q ₁	1	2	3
7	24. X—1929	—	0,19	0,24	—	—	11	13	4
	17. VII—1930	—	0,27	0,25	3,97	3,00	19	17	1
	16. III—1931	0,03	0,20	0,27	2,89	2,18	12	12	3
6	8. VII—1929	—	0,12	0,17	1,04	0,787	—	—	—
	25. X	—	0,12	0,18	0,80	0,67	—	—	—
	17. XII—1930	—	0,20	0,25	2,89	2,18	—	—	—
	16. III—1931	—	0,18	0,27	2,89	2,18	—	—	—

В эту таблицу занесены также величины расходов в конце соби-
рателя Q , расхода $Q_1 = \frac{Q}{L}(L-l_1)$ и глубин в колодцах по замерам в те
же дни, если таковые замеры имеются.

Сравнивая данные этой таблицы с вычисленными скоростями
(вычисление скоростей приведено в таблице 5), соответствующими вто-
рому приближению, принятому при определении коэффициентов шерохо-
ватости, видим, что для собирателя №6 наблюдаемые и вычисленные
скорости достаточно хорошо совпадают. Для собирателя же №7 вычис-
ленные скорости значительно меньше наблюдаемых.

Таблица 5

№№ по пор.	№ соби- рателя	Q ₁	h ₁	ω	$v = \frac{Q_1}{\omega}$	Примечание
1	7	1,369	8,12	0,0099	0,138	Значительное заиливание
2		1,730	11,20	0,0143	0,121	
3		2,000	12,00	0,0153	0,131	
4		1,807	13,00	0,0161	0,110	
5		2,928	13,66	0,0109	0,173	
6		2,610	13,30	0,0167	0,156	
7		1,561	16,73	0,0137	0,113	Значит. заиливание
8		0,740	10,80	0,0138	0,054	То же
9		0,560	10,00	0,0126	0,044	То же
10	6	0,492	4,16	0,0040	0,123	
11		1,370	6,50	0,0074	0,135	
12		1,640	6,70	0,0077	0,212	
13		2,180	8,50	0,0104	0,213	
14		3,000	9,66	0,0121	0,247	
15		3,640	11,80	0,0151	0,243	
16		1,940	7,90	0,0094	0,206	

Это обстоятельство заставляет полагать, что собиратель № 7 почти все время несколько заилен. Благодаря этому, живое сечение фактически меньше чем при подсчетах по измеренным глубинам (от дна трубы до поверхности воды).

Так, для глубины $h_1 = 12$ имеем скорость замеренную $v_z = 0,23$, а скорость подсчитанную $v_n = 0,13$. Отношение их равно:

$$\frac{v_z}{v_n} = \frac{0,28}{0,13} = 1,77$$

Для глубины $h_1 = 11$ см аналогично получаем:

$$\frac{v_z}{v_n} = \frac{0,21}{0,12} = 1,75$$

Это показывает, что площадь живого сечения в $\sim 1,75$ раза меньше введенной при подсчете коэффициента шероховатости для собирателя № 7.

Изменение площади живого сечения до $\omega_0 = 1,75 \omega$ отражается соответственно на величинах χ , R и коэффициентах C .

Для периодов 2-го и 3-го получаем:

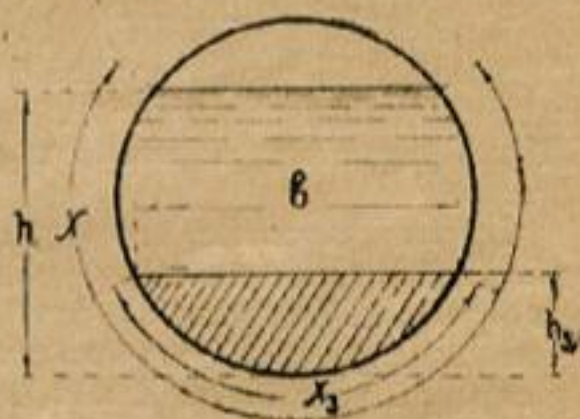
Таблица 6

№	ω	ω_0	$\Delta\omega$	h_1	χ_1	b	$\Delta\chi$	χ	χ_0	$R_0 = \frac{\omega_0}{\chi_0}$	$\sqrt{R_0}$	Примечание
2	0,0143	0,0082	0,0061	5,5	19,4	14,5	4,9	31,3	26,4	0,0310	0,176	
3	0,0153	0,0088	0,0065	5,8	20,1	14,7	5,4	33,3	27,9	0,036	0,177	
										Ср.	0,1765	

Поэтому $\frac{(\sqrt{R_0})_{\text{ср}}}{(\sqrt{R})_{\text{ср}}} = \frac{0,1765}{0,2115} \approx 0,82$

$$\frac{C_0}{C} = \frac{\omega \sqrt{R}}{\omega_0 \sqrt{R_0}} = 1,75 \cdot \frac{1}{0,82} = 2,13$$

$$C_0 = 2,13 \cdot \frac{19,1 + 20,5}{2} = 42,3$$



Откуда по формуле (А) получаем:

$$n = \frac{(42,3 - 23) \cdot 0,176}{2,23 \cdot 42,3} + \sqrt{0,00173^2 + \frac{0,176}{23 \cdot 42,3}}$$

$$\text{т. е. } n = 0,0118.$$

§. 5. Таким образом, получаем для собирателя № 7 большой диапазон в величинах подсчитанных коэффициентов шероховатости в пределах от $n \approx 0,020$ до $n \approx 0,012$ (в сокращенной формуле Гангилье-Куттера). Приведенных данных опытных исследований по этому собирателю для большего уточнения значений коэффициента шероховатости недостаточно. Материалы наблюдений и произведенные подсчеты в значительной мере характеризуют работу этого собирателя.

По собирателю № 6 измеренные скорости, как приведено выше, достаточно близко совпадают с вычисленными значениями $(v = \frac{Q}{\omega})$ величина коэффициента шероховатости в формуле Гангилье-Куттера колеб-

лется в значительно меньших пределах и может быть принята равной $n=0,0148$

Для сравнения приведем данные американской практики и норм (собранные Н. В. Макридиным).¹

Таблица 7

№№ по порядку	Источники	Коэффициент шероховатости n
1	Опыты Lignell'a для гончарных труб в зависимости от их диаметра и наполнения	0,0105—0,0202
2	Russel «Text-book of Hydraulics» для гончарных труб при обыкновенной кладке	0,015
3	Расчетный график для гончарных дренажных труб Сев. Амер. Бюро	0,015
4	Северо-американская дренажная практика	0,013—0,017

Приведем еще некоторые данные из таблиц XI и XII книги „О равномерном движении жидкости в каналах и трубах“ проф. Бахметева Б. А., изданной в 1931 г. Как указано в предисловии к этой книге, эти данные заимствованы редакцией у King'a (Handbook of Hydraulics).

Табличные данные и нормы значений коэффициентов шероховатости (по Horton'у) для формул Гангилье-Куттера и Маннинга для обычных керамиковых дренажных труб таковы:

- $n=0,011$ при очень хорошем состоянии поверхности труб.
- $n=0,012$ —при хорошем „ „
- $n=0,014$ —при обычном „ „
- $n=0,017$ —при плохом „ „

(из таблицы XI цитированной книги). При этом $n=0,012$ и $n=0,014$ отмечены как обычные в расчетной практике. Таблица не разделяет значений коэффициентов и относит их одинаково как к той, так и другой формуле.

Однако, известно, что формулы Гангилье-Куттера и Маннинга имеют одинаковые значения коэффициента шероховатости только в определенных пределах числовых значений R и C , что наглядно иллюстрирует сравнение коэффициентов шероховатости по Гангилье-Куттеру, Маннингу и Базену для различных R и i , приведенное в таблице XII той же книги „О равномерном движении“.

В частности, для гидравлического радиуса $R=0,03$ и $R=0,06$ в этой таблице (XII) имеем данные, вынесенные в таблицу 8.

Подсчеты по формуле Маннинга

$$v_1 = \frac{1}{C} \cdot R^{2/3}$$

для собирателя № 6 на основании данных тех же наблюдений в Золотой орде дают следующие сведенные в таблицу 9 значения:

¹ О коэф. шероховатости гончарных водосточков, кирпичных и бетонных труб см. также Труды второго всесоюзного водопроводного и санитарно-технического съезда, выпуск 2, часть II, изд. 1931 г. стр. 126. Доклад проф. П. Ф. Горбачева

Таблица 8

R	C	По Гангиле-Куттеру		По Маннингу n_1	По Базену γ
		$1=0,0004$	$1=0,001$		
0,03	5,62	0,047	0,049	0,101	2,57
	8,29	0,037	0,038	0,067	1,66
	11,04	0,029	0,031	0,051	1,20
	16,56	0,022	0,023	0,034	0,74
	22,07	0,018	0,019	0,025	0,51
	27,60	0,015	0,016	0,020	0,38
	41,40	0,011	0,012	0,014	0,19
	55,20	0,009	0,010	0,010	0,10
0,06	8,29	0,042	0,043	0,076	2,35
	11,04	0,037	0,038	0,057	1,70
	16,56	0,027	0,028	0,038	1,05
	22,07	0,022	0,022	0,028	0,72
	27,60	0,018	0,019	0,023	0,53
	41,40	0,013	0,014	0,015	0,32
	55,20	0,011	0,011	0,011	0,14
	69,10	0,009	0,009	0,009	0,06

Таблица 9

№	$\sqrt{R}$	R^2	По I приближению		По II приближению	
			C	n_1	C	n_1
10	0,155	0,537	33,1	0,0162	25,0	0,0214
11	0,185	0,570	41,2	0,0130	31,3	0,0183
12	0,187	0,571	47,0	0,0121	35,5	0,0161
13	0,202	0,586	43,3	0,0135	32,7	0,0179
14	0,208	0,593	50,0	0,0119	37,7	0,0157
15	0,215	0,599	47,6	0,0126	36,0	0,0166
16	0,197	0,582	43,6	0,0133	33,0	0,0174
Средн.				0,0134		0,0175



Рис. 4

На рис. 4 приведена кривая зависимости расхода от наполнения, подсчитанная при коэффициенте шероховатости по Маннингу $n_1=0,0175$ для шкалы наполнений h_1 ; величины расходов взяты в пропорции $Q=Q_1 \frac{L}{L-L_1}$ т. е. приведены к значениям в конце собирателя.

На рисунке крестиками помечены наблюдаемые значения для собирателя № 7. Разбросанность этих точек дает наглядное представление о неодинаковости работы собирателя № 7 в различные периоды, о его заиляемости.

Кружками помечены наблюдаемые величины для собирателя № 6 (срав. таблицу 3). Кривая Q проходит между этими точками.

Приведем еще подсчеты по формуле Куттера („лучшей формулой считается формула Куттера, в которой придается значение $K=0,27$ “ — см. С. П. Тромбачев—Орошение и осушение, стр. 405 изд. 1932 г.)

Формула Куттера имеет вид:

$$C = \frac{100}{1 + \frac{K}{\sqrt{R}}}$$

$$\text{Откуда } K = \frac{100 - C}{C} \sqrt{R}$$

Результаты подсчетов сводим в таблицу 10, где одновременно приведены и результаты подсчетов по формуле Базена

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} \quad \text{или} \quad \gamma = \frac{87 - C}{C} \sqrt{R}$$

Таблица 10

№ по поряд.	$\sqrt{R}$	I приближение			II приближение		
		C	K	γ	C	K	γ
10	0,155	33,1	0,314	0,252	25,0	0,465	0,385
11	0,185	41,2	0,262	0,206	31,3	0,406	0,328
12	0,187	47,0	0,212	0,211	35,5	0,341	0,272
13	0,202	43,3	0,264	0,203	32,7	0,415	0,334
14	0,208	50,0	0,208	0,154	37,7	0,344	0,272
15	0,215	47,6	0,217	0,178	36,0	0,382	0,305
16	0,197	48,6	0,254	0,186	33,0	0,380	0,323
		Средн.	0,25	0,20		0,390	0,288

Таким образом, по второму приближению для собирателя № 6 получено:

Таблица 11

Для формулы	Коэффициент шероховатости
Сокращенная Гангильо-Куттера	$n = 0,0148 \cong 0,015$
Маннинга	$n_1 = 0,0175 \cong 0,018$
Куттера	$K = 0,390 = 0,39$
Базена	$\gamma = 0,287 \cong 0,29$

Эти значения являются средними для наполнений $\frac{h}{d} =$ от 0,28 до 0,78 при шестидюймовой дрене ($d=151$ мм). Значения гидравлического радиуса колеблются в пределах $R =$ от 0,024 до 0,046 при уклоне дрен $i \cong 0,001$.

Быстроток на канале Янги-даргом

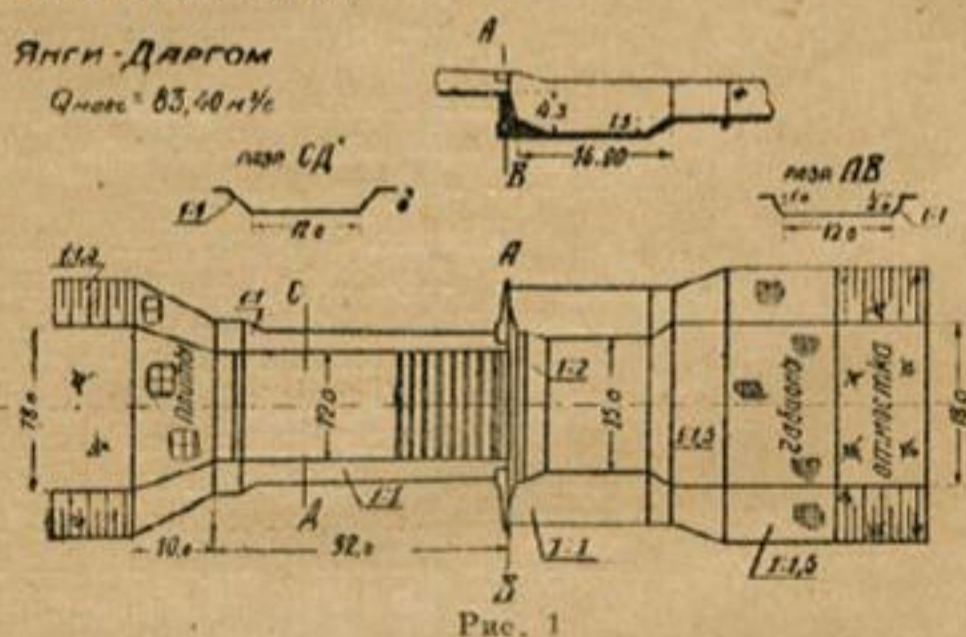
(с искусственной шероховатостью)

1. Введение. Методы, принятые при исследованиях. Описание сооружения

В последнее время на некоторых ирригационных сооружениях в Средней Азии осуществлена искусственно-повышенная шероховатость. В частности перепад на пикете № 30 + 31 Янгидаргомского канала имеет увеличенную шероховатость.

Летом 1931 г. отрядом Института было произведено изучение гидравлических элементов этого перепада (а также и ряда других на этом канале). Исследования протекания воды были проведены в период между 4.VIII и 26.IX

Сооружение представляет собой комбинацию перепада с быстротоком, при чем быстроток заканчивается стенкой падения, как это видно из рис. 1. Сооружение рассчитано на пропуск расхода $Q_{\max} = 83,40 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Общее падение $P = 3,80 \text{ м.}$ На длине около 30 м с уклоном $i \approx 0,05$ теряется $p = 0,05 \times 30 \approx 1,5 \text{ м.}$ Остальное приходится на собственно перепад, осуществленный в виде стенки падения, при чем колодец устроен глубиной около 1,5 м.



Так как в конце быстротока с гладким бетонным дном при проектировании максимальная скорость была определена равной $v_{\max} = 7,56 \text{ м/сек.}^1$, то в концевой части быстротока была запроектирована повышенная шероховатость.

Коэффициент шероховатости при этом принят равным $n = 0,020$ против $n = 0,014$ для гладких бетонных стенок (для формулы Гангиле-Куттера).

¹ Допустимая скорость в проекте принята $v = 6,50 \text{ м/сек.}$ См. пояснительную записку Зерстроя к проекту перепада на пикете № 30 + 31

В осуществление этого коэффициенты сделаны поперек быстрого тока ребра (планки) прямоугольного сечения высотой $d=5$ см и шириной $a=40$ см с расстоянием в свету между ними $l=100$ см. Быстрый ток трапециoidalного поперечного сечения шириной по дну $B=12$ м и откосами $m=1$ (см. рис. 1).

При исследованиях наблюдалась свободная поверхность потока при различных расходах воды. Поверхность нивелировалась по оси быстрого тока, для чего в ряде поперечников был перекинут сильно натянутый стальной трос с затязками на береговых опорах. По середине тросов (над осью быстрого тока) через кольцо пропускался канатик с отвесом. В момент касания отвесом горизонта свободной поверхности брались отсчеты по горизонтальной рейке, уложенной на берегу. Нуль рейки связан с отметкой репера. Дно нивелировалось в период перерыва в пропуске воды по каналу.

Величины расходов получены от эксплуатационного штата для тех же часов, когда производились наблюдения за горизонтами свободной поверхности.

II. Материалы наблюдений

Исследования были произведены при расходах $Q_1 \cong 65$ м³/сек., $Q_2 \cong 34$ м³/сек. и $Q_3 \cong 29$ м³/сек.

На рис. 2 приведены данные наблюдений. Глубины получены вычитанием из отметки горизонта свободной поверхности отметки дна соответствующего поперечника. Таким образом получено распределение глубин по оси быстрого тока (измерение распределения глубин по поперечникам произведено не было). В таблицу 1 сведены данные распределения глубин.

Таблица 1

Расстояние от входа на быстрый ток 1 м		0	5	10	15	20	25	28	30
Глубины при расходах Q м ³ /сек.	1	61,10	1,45	1,06	0,90	0,81	0,78	0,75	0,67
	2	33,50	1,27	0,89	0,72	0,67	0,65	0,68	0,52
	3	23,90	0,9	0,78	0,7	0,6	0,63	0,6	0,48

В последнем столбце ($l=30$ м) приведены глубины над стенкой перепада. Из таблицы и из рис. 2 легко усматривается, что на некото-



Рис. 2

рой части быстротока глубины сохраняются почти постоянными. Постоянство глубин при каждом из трех расходов наблюдается в пределах части быстротока с искусственной шероховатостью. Поэтому практически можно считать, что в этих пределах по длине быстротока устанавливается равномерный режим при всех трех расходах воды.

III. Результаты наблюдений

Это обстоятельство позволяет применить к данному случаю уравнение равномерного режима и формулу Шези

$$Q = \omega \cdot C \cdot \sqrt{Ri}$$

Пользуясь различными эмпирическими формулами для вычисления коэффициента Шези C , сможем найти входящие в них значения коэффициентов шероховатости. Не приводя здесь эти формулы (они приведены выше в статье В. Н. Ярцева и др. в этом сборнике), примем для коэффициентов шероховатости обозначения:

- γ — в формуле Базена;
- n — " " Гангилье-Куттера;
- n_1 — " " Маннинга;
- n_2 — " " проф. Павловского.

Пользуясь полученными из наблюдений данными и вводя в расчет средние арифметические из четырех предпоследних значений глубин таблицы 1, получаем таблицу средних гидравлических элементов, при чем уклон принят равным $i = 0,045$.

Таблица 2

№	Дата	Q	H _{ср}	ω	χ	R	C	Примечание
1	4. VIII	65,1	0,79	10,10	14,23	0,710	35,97	
2	18. IX	33,5	0,68	8,62	13,92	0,619	23,26	
3	26. IX	28,9	0,63	7,96	13,78	0,577	22,57	

Подсчеты коэффициентов шероховатости дают следующие значения:

Таблица 3

№	γ	n	n_1	n_2
1	1,19	0,025	0,026	0,026
2	2,14	0,038	0,040	0,037
3	2,17	0,038	0,040	0,038

В таблице 2 глубины $H_{ср}$ соответствуют разностям отметок дна и поверхности воды.

В случаях применения искусственной шероховатости обычно в расчет вводится глубина над реостом (планкой).¹ Если учесть высоту ребра (планки), равную $d = 5$ см, то будем иметь следующие расчетные значения гидравлических элементов.

¹ См. напр. Запаркин Е. А. Гидротехнические соору. т. I, изд. Сибгипрводо 1932 г. см. также статью в конце этого сборника.

Таблица 4

№	Q	h	ω	λ	R	C	Примечание
1	65,1	0,74	9,50	14,19	0,669	41,01	i = 0,045 b = 12,10 м
2	33,5	0,63	3,02	13,88	0,578	25,97	
3	28,9	0,58	7,35	13,74	0,535	25,37	

Значения коэффициентов шероховатости получаем равными:

Таблица 5

№	γ	n	n_1	n_2
1	0,12	0,023	0,023	0,023
2	1,79	0,034	0,035	0,033
3	1,78	0,034	0,035	0,032

Из таблички легко видеть, что числовые значения коэффициентов шероховатости достаточно велики по сравнению с гладкими бетонными стенками и увеличиваются с уменьшением расхода воды. Так как наблюдениями не зазначен максимальный расход, то уточнить значение коэффициента $n = 0,020$, принятое в проекте для $Q = 83,40$, невозможно. Повидимому, оно достаточно соответствует фактическому (см. рис. 3). Приведем табличку значений коэффициентов шероховатости, учитывающую в определении расхода, а следовательно и коэффициента Шези C возможную ошибку $\pm 5\%$.

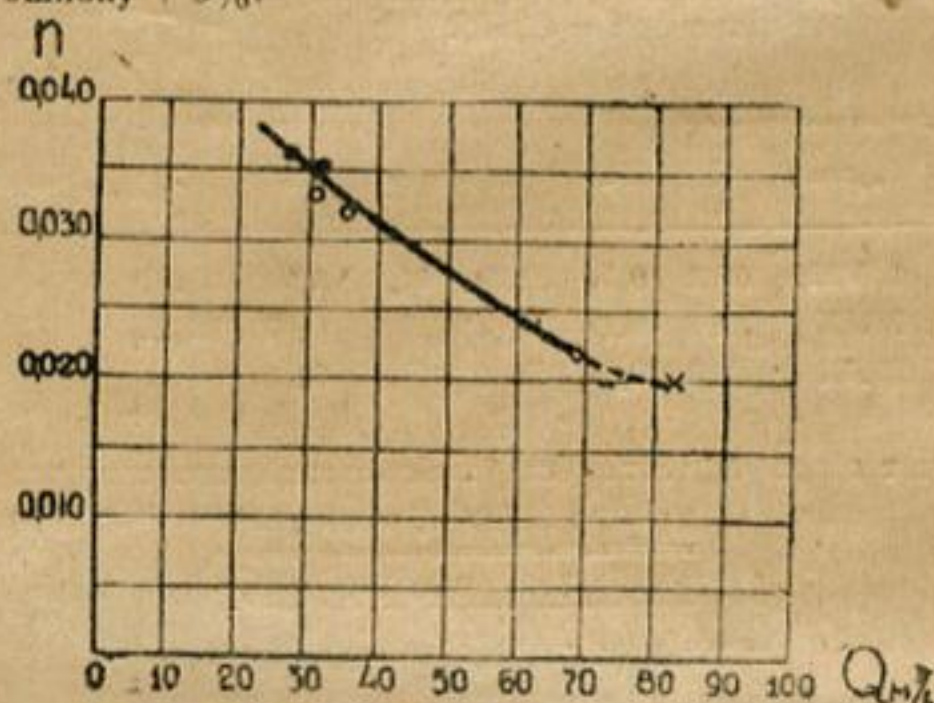


Рис. 3

Таблица 6

Ошибка	№	C	γ	n	n_1	n_2
+5%	1	43,06	0,83	0,022	0,022	0,022
	2	27,37	1,66	0,032	0,033	0,032
	3	26,64	1,66	0,033	0,034	0,031
-5%	1	38,96	1,01	0,021	0,021	0,021
	2	24,67	1,62	0,035	0,037	0,035
	3	24,10	1,91	0,036	0,037	0,034

Сопоставление зависимости расхода воды от глубины по наблюдениям отряда Института в 1930 г. на створе пик. $39+21,75$ с данными измерений глубин, произведенных в период описываемых исследований, заставляет считать данные эксплуатационного штата о проходивших расходах не совсем точными. Из графика, построенного по соответственным данным (см. рис. 4) имеем значения расходов, приведенные во втором столбце таблицы № 7.

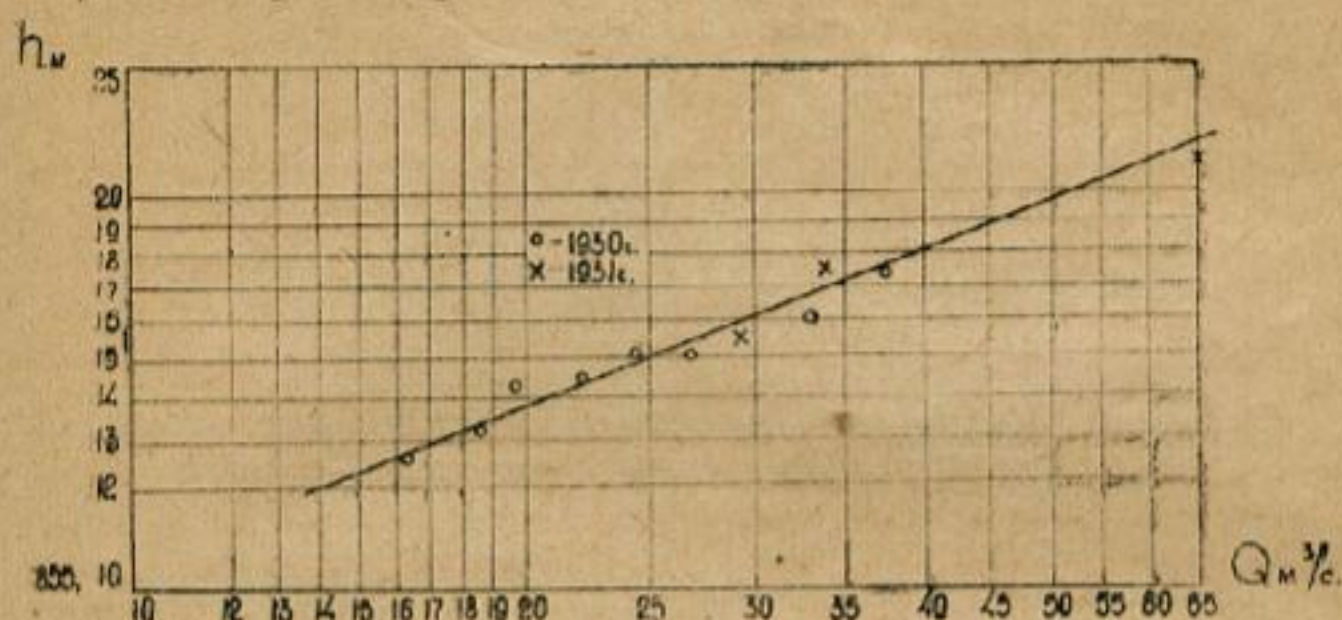


Рис. 4

В этой таблице подсчитаны соответственные значения коэффициента Шези-С.

Таблица 7

№	Q	h	m	L	R	C	Примечание
1	60,0	0,74	9,50	14,10	0,669	29,8	$t=0,45$
2	37,5	0,63	8,02	13,88	0,578	23,6	$b=12,10$ м
3	27,5	0,58	7,35	12,74	0,535	19,6	$d=0,05$ м

Применяя эмпирические зависимости, подсчитываем значения коэффициентов шероховатости γ , Π и Π_1 .

Значения коэффициентов шероховатости получаем равными:

Таблица 8

№	γ	Π	Π_1
1	1,55	0,0393	0,9312
2	2,03	0,0375	0,9388
3	2,51	0,0381	0,9458

Быстроток сброса канала Дальверзин

I. Описание наблюдений на криволинейном быстротоке сброса Дальверзинского магистрального канала

Облицованное русло с поворотом в плане под центральным углом $\alpha = 40^\circ$; с радиусом закругления $R = 150$ м; шириной по дну $b \approx 2,80$ м, одиночными откосами и уклоном дна $i \approx 0,07$ — таков быстроток сброса Дальверзинского магистрального канала (на пикете 142+20).

Вход на быстроток перекрыт секторным щитом, при чем в период исследований¹ подъемным механизмом служили тали на треноге из бревен (см. рис. 1), где видны также и детали стенок сооружения.

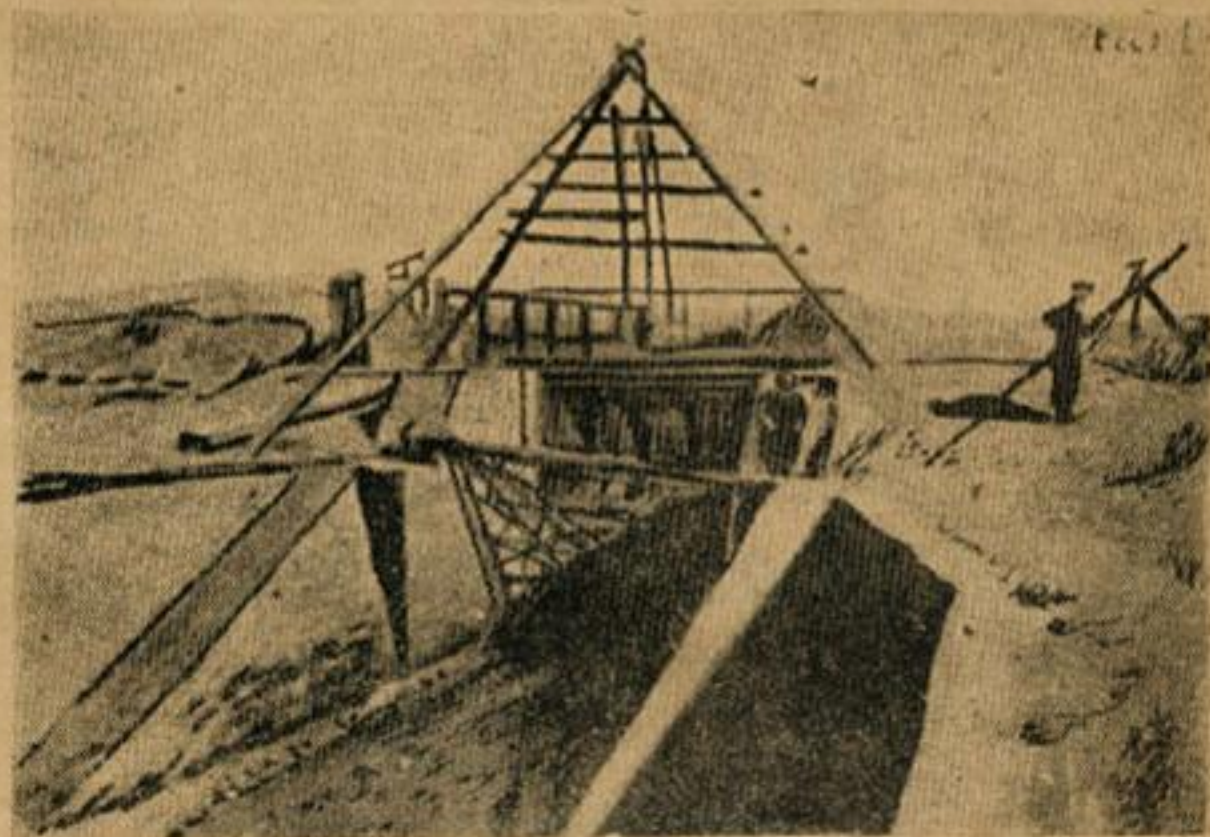


Рис. 1

¹ Отряд Ср.-Аз. Научно-Исследовательского Института ирригации исследовал ряд гидротехнических сооружений на каналах и на мелкой сети, а также ряд гидравлических элементов сдвой сети Дальверзинской системы летом 1931 г. Начальник отряда К. К. Дмитриев.

Начало сброса расположено в узле гидротехнических сооружений, где сосредоточены, кроме сброса, перегораживающее сооружение на магистральном канале, головное сооружение распределителя Хоз-яса и голова водовыпуска, в который в период обследования вода не поступала.

Наблюдения при исследовании были сделаны при одном расходе воды в сбросе $Q = \sim 7 \text{ м}^3/\text{сек}$. Расход определен по разности измеренных расходов в магистральном канале выше узла (на 200 м), ниже узла (на 250) и в распределителе Хоз-яса. При таком определении не учтены потери на просачивание в грунт на соответствующих участках¹.

Схема расположения узла сооружений и места расположения створов, где производились измерения расходов, приведены на рис. 2.

Створ № 1. Холостая часть канала Дальверзин. Створ на 200 м выше узла сооружений. Измерение скоростей произведено² с понтона на 11 вертикалях через 1 метр. Измерения по одной точке (0,6 Н) на вертикали; $Q_1 = 13,280 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Створ № 2. Рабочая часть канала Дальверзин, створ на 250 м ниже узла сооружений. Измерения скоростей с гидрометрического мостика на 7 вертикалях через 1 м по одной точке (0,6 Н) на вертикали; $Q_2 = 3,290 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Створ № 3. Распределитель Хоз-яса. Створ расположен на 400 м ниже узла с гидрометрического мостика на 6 вертикалях через 1 м по одной точке (0,6 Н) по вертикали; $Q = 2,377 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Створ № 4. Оксютковский ороситель X—4 вправо из Хоз-яса между узлом и створом № 3; три вертикали через 0,5 м; $Q = 0,700 \text{ м}^3/\text{сек}$. Таким образом, в голове Хоз-яса расход равен $Q_3 = 0,700 + 2,377 = 3,077 \text{ м}^3/\text{сек}$. (без учета потерь на просачивание). Расход в сбросе следовательно равен $Q = Q_1 - Q_2 - Q_3 = 6,913 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Быстроток сброса, криволинейный в плане, свыше 330 м длины, заканчивается консолью, с которой вода сбрасывается в Сыр-дарью.

Во время наблюдений была произведена нивелировка урезов воды через 10 м по ходу, разбитому на левом берегу сброса. Как видно из рис. 2, по выходе из под щита поверхность воды постепенно выравнивается по кривой подпора, затем на всем протяжении быстротока глубина сохраняется почти постоянной около 0,5 м. Приведенная на рис. 2 таблица дает возможность видеть изменение скоростей по длине быстротока, при чем каждое из значений является средним из пяти наблюдений за поплавками. Более подробно результаты наблюдений поверхностных скоростей при помощи поплавков приведены в таблице 1.

В последней строке этой таблицы приведена средняя поверхностная скорость по всей длине быстротока. Эти наблюдения, так же как и нивелировка урезов воды на быстротоке были проведены 22.X-31 г. в течение около 7,5 часа (с 9 до 16,5) в ясный безветренный день, при чем за этот период на контрольных рейках на створах горизонты воды наблюдались совершенно постоянными.

Нивелировка отметок урезов на быстротоке была произведена с учетом колебаний: урез максимум и урез минимум по правому и левому берегу. По другим вертикалям отметки свободной поверхности не

¹ Величина потерь при просачивании здесь невелика и, кроме того, при подсчетах коэффициента шероховатости это обстоятельство учитывается изменением расхода на +5%.

² Вертушка ИВХ № 237.

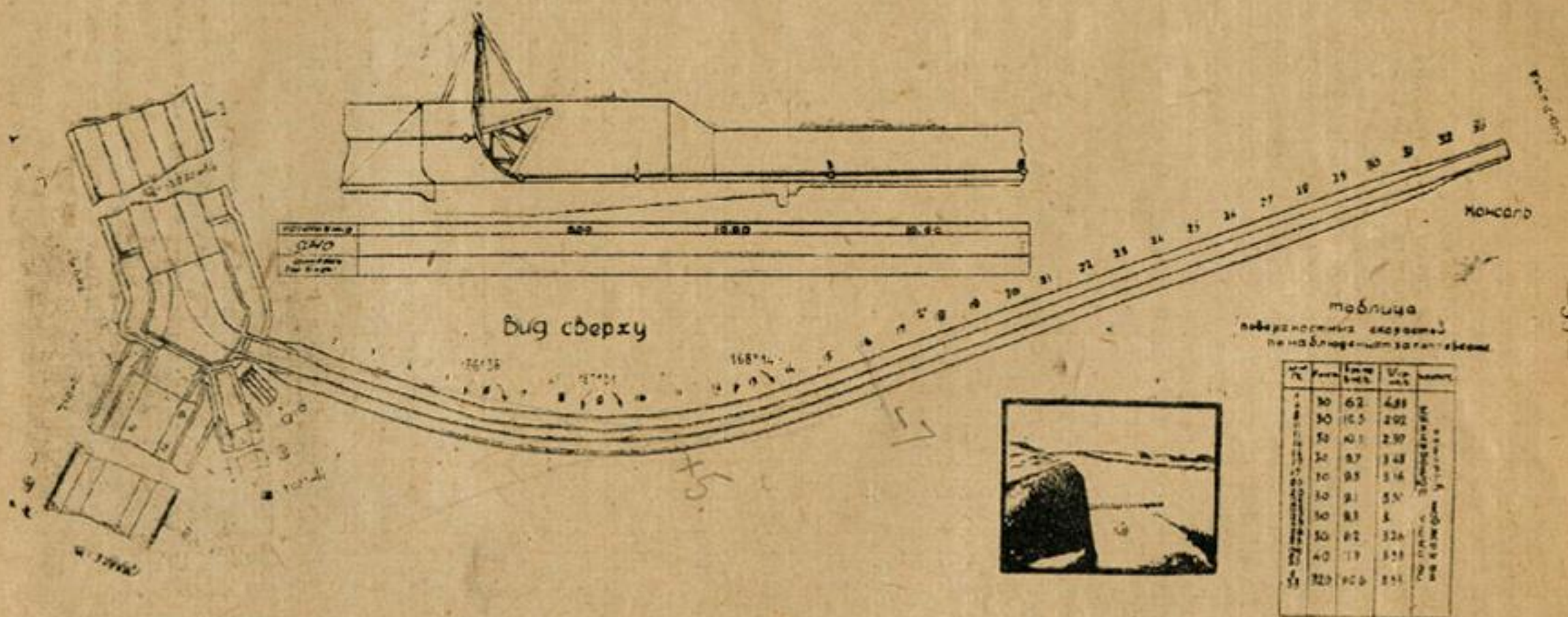


Рис. 2

Таблица 1

Наблю- дения между попереч- никами №№ и расстоя- ние	№№ поп- лав- ков	Время прохож- дения поплав- ка в се- кундах	Скорость по- плавка по от- дельным на- блюдениям и средняя ско- рость в м/сек	Наблю- дения между попереч- никами №№ и расстоя- ния	№№ поп- лав- ков	Время прохож- дения поплав- ка в се- кундах	Скорость по- плавка по от- дельным на- блюдениям и средняя ско- рость в м/сек		
1—4 30	1 2 3 4 5	5,6 6,3 6,2 6,3 6,4	5,36 4,76 4,84 4,76 4,60	4,88	2—30 30	1 2 3 4	8,9 9,3 8,9 9,4	3,37 3,22 3,37 3,19	3,20
8—11 30	1 2 3 4 5	10,2 10,6 10,5 10,2 9,8	2,94 2,83 2,86 2,94 3,06	2,93	23—26 30	1 2 3 4 5	9,4 8,9 9,5 9,2 9,3	3,19 3,39 3,16 3,26 3,22	3,24
11—14 30	1 2 3 4 5	10,2 10,4 10,0 9,6 10,3	2,94 2,88 3,00 3,12 2,92	2,97	26—29 30	1 2 3 4 5	8,5 9,5 9,4 9,4 9,2	3,53 3,16 3,19 3,19 3,26	3,27
14—17 30	1 2 3 4	8,5 8,6 9,0 8,8	3,53 3,49 3,33 3,41	3,43	29—33 40	1 2 3 4 5	12,2 11,7 11,8 12,0 14,7	3,28 3,42 3,39 3,33 3,42	3,37
17—20 30	1 2 3 4 5	9,7 10,9 8,5 8,5 8,4	3,09 2,75 3,53 3,53 3,57	3,29	1—33 330	1 2 3 4	90,4 90,3 90,8 96,9	3,65 3,65 3,63 3,64	3,64

нивелировались. Дно нивелировалось опусканием тяжелого лома (2—3 см), удерживаемого с перекинутой передвижной лестницы, видной на рис. 2. Данные нивелировки приведены в таблице 2.

Как легко видеть из этой таблицы, на поперечниках, разбитых на повороте, отметки воды на урезах правого и левого берега различны

благодаря развивающимся центробежным силам. Так, на поперечнике № 11 урез правого берега на 5,3 см выше уреза левого берега. Как видно из рис. 2, вход на поворот в достаточной мере плавный. На рис. 3 приведена фотография закругления в период наблюдений. Из таблицы 2 легко усмотреть, что сразу за поворотом превышение уреза правого берега над левым меняется на обратную картину; так, на поперечнике № 16 урез правого берега ниже уреза левого на 7 см.



Рис. 3

Таблица 2

1	№№ поперечников			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	Отметки	Прав. берег	Макс.	6,273	6,316	6,289	6,266	6,195	6,171	6,036	6,095	6,059	5,950	5,888	5,850	5,801	5,561	5,560	5,419	5,461
			Мин.	6,229	6,210	6,177	6,147	6,119	6,096	5,995	5,986	5,982	5,868	5,802	5,766	5,723	5,502	5,501	5,352	5,391
		Лев. берег	Макс.	6,237	6,328	6,267	6,289	6,237	6,141	6,103	6,027	6,013	5,946	5,825	5,833	5,707	5,661	5,485	5,475	5,413
			Мин.	6,237	6,239	6,475	6,124	6,158	6,078	6,027	5,965	5,946	5,888	5,758	5,773	5,643	5,606	5,541	5,435	5,373
3		Дно (среднее)		5,981	5,934	5,887	5,762	5,725	5,668	5,578	5,518	5,478	5,358	5,308	5,268	5,178	5,115	5,026	4,984	4,912
4		Среднее превышение уреза правого берега над левым	—	0,014	0,007	0,000	0,024	0,011	0,010	0,053	0,005	0,087	0,017	0,028						
			—	0,021	—	0,041	0,039	—	0,008	—	—	0,103	—	0,069	—					
5		Средн. скорость		—	—	—	4,80	4,19	4,36	4,03	3,96	3,74	4,05	3,72	3,78	4,36	4,10	4,70	3,95	

1	№№ поперечников			18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
2	Отметки	Прав. берег	Макс.	5,370	5,270	5,121	5,116	5,051	5,002	5,039	4,866	4,747	4,748	4,707	4,666	4,683	4,493	4,310	4,154
			Мин.	5,282	5,136	5,096	5,050	5,056	4,941	4,982	4,809	4,696	4,677	4,630	4,570	4,603	4,423	4,257	4,124
		Лев. берег	Макс.	5,301	5,228	5,240	5,100	5,033	4,976	4,982	4,929	4,781	4,759	4,690	4,603	4,672	4,457	4,257	4,177
			Мин.	5,229	5,117	5,155	5,023	5,006	4,933	4,934	4,860	4,732	4,694	4,617	4,543	4,590	4,365	4,222	4,147
3		Дно (среднее)		4,802	4,706	4,649	4,575	4,492	4,438	4,412	4,375	4,250	4,212	4,173	4,060	4,054	3,951	3,842	3,802
4		Среднее превышение уреза правого берега над левым	+	0,061	0,021	0,084	0,021	0,048	0,018	0,042	0,056	0,034	0,020	0,012	0,047	0,044			
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
5		Средн. скорость		4,10	4,30	4,03	4,12	3,86	4,02	3,50	3,92	4,15	4,02	—	—	—	—	—	—

II. Выпуск Янги на Даргоме

Если в условиях Дальверзинского сброса явление превышения одного уреза над другим, отжим за поворотом и набегание на одиночные откосы имеет не ярко выраженный характер, то в условиях выпуска Янги из Янги-даргома это явление проявляется крайне резко. На рис. 4



Рис. 4

ясно видно движение воды на криволинейном участке с резкими набеганиями на откосы ($m=1$), смачиванием откосов (темная поверхность откоса) и сбоем струи от одного борта на другой. Явление это, происходящее из-за условий входа на криволинейный участок по выходе из под щитов, естественно наблюдается всякий раз в аналогичных условиях. Так, в запроектированном сбросе из напорного бассейна Кадырьинской ГЭС по выходе из под сброшенного щита или из промывных галлерей струя набегала на откос колодца и поднималась весьма высоко по этому откосу.

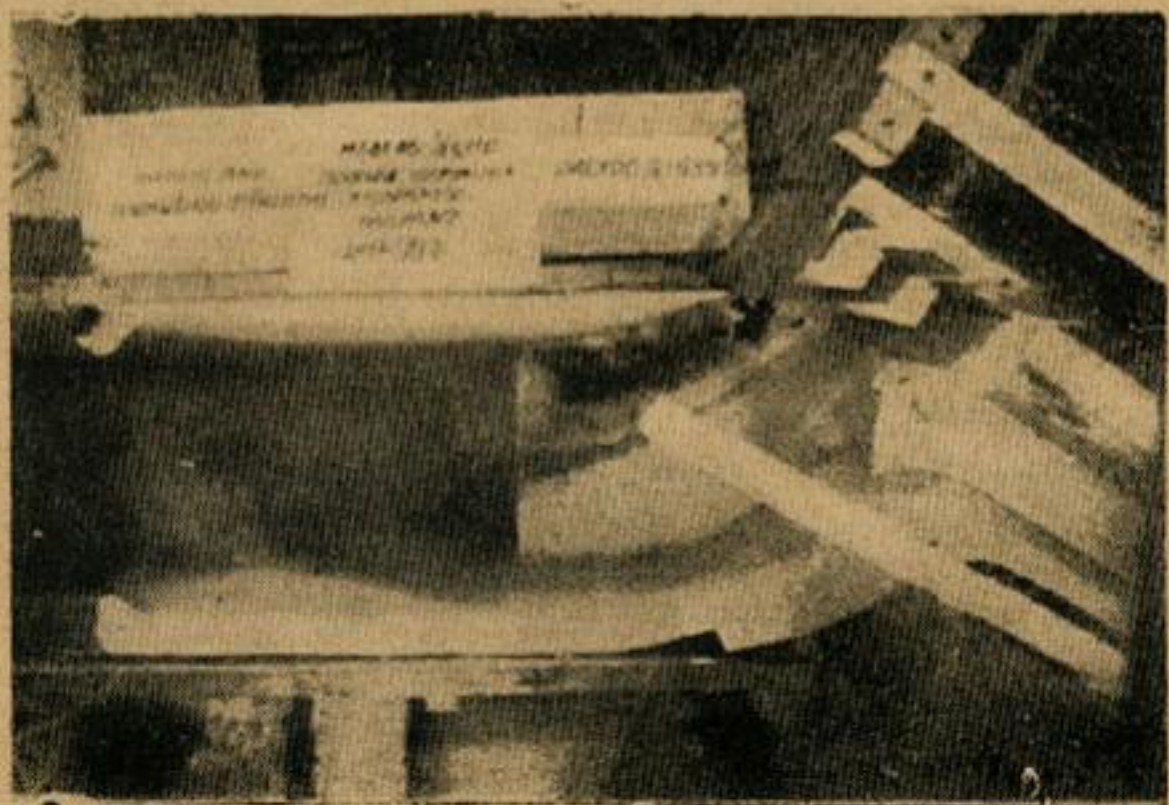


Рис. 5

На рис. 5 приведена фотография части модели в $\frac{1}{20}$ натуральной величины холостого водосброса (вид сверху). Благодаря такого рода условиям входа, в колодце возникают горизонтальные вихревые движения, сказывающиеся на движении потока в быстротоке за колодцем (сбойное течение). Явления эти наблюдались при исследованиях в гидравлической лаборатории Института в 1931 г. и были устранены после ряда конструктивных изменений моделей.

Распределение глубин по криволинейному участку выпуска Янги было наблюдеено при различных расходах в период исследований¹ и представлено в таблице 3.

III. Результаты наблюдений и числовые значения коэффициента шероховатости

„Для некоторых быстротоков (до 2—3 м шириной) с приемлемой для практики точностью уровень воды может быть построен так, что наклон уровня воды к горизонту считается равным

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{v^2}{g \cdot R}$$

где v — средняя скорость воды на повороте;

R — радиус закругления, считаемый от середины дотка прямоугольного сечения;

g — ускорение силы тяжести².

Обращаясь к условиям Дальверзинского быстротока, имеем

$$v \approx 4 \text{ м/сек.}$$

$$R = 150 \text{ м}$$

Поэтому

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{16}{150 \cdot 9,81} = 0,011$$

Следовательно, эта формула дает при $b = 2,80 \text{ м}$ превышение $h \approx 0,03 \text{ м} = 3 \text{ см.}$

Вводя ширину по верху (при $m = 1$) $B = 3,8 \text{ м}$, получим $h = 4,2 \text{ см.}$

В условиях Дальверзинского сброса при $m = 1,4$ наибольшее среднее превышение на протяжении закругления равно 3,7 см (см таблицу 2). В данном случае все же расходимость незначительная, но надо иметь в виду, что эту формулу следует применять лишь при сравнительно небольших скоростях и спокойном течении. Точно также формула, приведенная у Форхгеймера („Гидравлика“), а также у Горчина и Чертоусова („Гидравлика и задачи“) предполагает спокойное и не быстрое течение. Формула имеет вид

$$h = \frac{v^2}{g} \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}$$

При этом пренебрегают влиянием вращения земли и предполагается равномерное распределение скоростей по сечению. Здесь

v — средняя скорость в сечении;

g — ускорение силы тяжести;

r_1 и r_2 — наружный и внутренний радиусы закругления;

$\ln$ — натуральный логарифм.

¹ Исследования проведены техником Д. П. Семенушкиной в отряде В. Н. Дмитровского в 1931 г.

² См. Е. А. Замарин — Гидротехнические сооружения, т. I.

Янги-Даргом
Выпуск Янги

Таблица 3

№ п/п	Рассто- яние (в м)	Отмет- ка дна (в м)	Отметки поверхности во- ды 9/VIII-31 г. Q=12,16 м³/сек.			Глубина по оси сооруж. (в м)	Отметки поверхности воды 19/IX-31 г. Q=7,37 м³/сек.			Глубина по оси (в м)	Отметки поверхн. воды 27/IX-31 г Q=1,40 м³/сек			Глубина по оси (в м)
			Лев.	Ось	Прав.		Лев.	Ось	Прав.		Лев.	Ось	Прав.	
1		861,47	865,481	—	865,518	1,03		865,077	—	0,61	—	864,729	—	0,26
2	5,2	,47	,141	—	865,155	0,68		865,276	—	0,81	—	864,604	—	0,13
2a	2,0	,43	,723	865,211	865,861	0,81	864,971	864,999	865,313	0,57	—			
3	4,41	,35	,573	865,140	865,476	0,79	865,245	864,852	864,999	0,50	—	864,545	—	0,20
3a	2,9	,32	,355	866,255	864,748	1,94	865,000	865,579	864,749	1,26	—	—	—	—
4	9,56	,32	,573	865,180	865,193	0,96	865,093	864,850	864,852	0,63	—	864,472	—	0,25
5	9,65	,08	,888	864,908	865,003	0,83	865,136	864,686	864,726	0,68	—	864,390	—	0,31
5a	5,10	,05	,517	865,680	864,402	1,63	865,319	—	864,509	0,81	—	—	—	—
6	5,10	863,95	,072	865,000	865,005	1,05	864,600	864,543	864,730	0,69	—	864,182	—	0,21
7	12,22	,75	,092	864,814	864,759	1,06	864,488	—	864,361	0,67	—	864,075	—	0,32
8	37,19	,32	—	864,135	—	0,92	—	863,902	—	0,68	—	863,896	—	0,18
9	14,40	862,820	—	—	—	—	—	864,163	—	,30	—	—	—	—

В наших условиях $v = 4$ м; $r_1 = 152$; $r_2 = 148$ м (по урезу).

Переходя к десятичным логарифмам и подставляя соответственные значения, получаем

$$h = 2,3 \cdot \frac{16}{9,81} \cdot \lg \frac{152}{148} = 0,043 \text{ м}$$

В применении к случаю Дальверзинского сброса эта формула даст преуменьшенные величины, в общем сравнительно близко подходящие к наблюдаемым значениям.

Естественно, на криволинейном участке быстротока должны иметься сопротивления (потери напора) от дополнительного перераспределения скоростей и от циркуляции воды в поперечном сечении. Для величины ξ в выражении

$$h_w = \xi \cdot \frac{v^2}{2g}$$

проф. А. Я. Милович дает формулу¹

$$\xi = \left[\frac{4 \cdot a \cdot R^2}{(R^2 - a^2)^2 \left(1 - \frac{a^2}{mR^2} \right)^2} \right] (n + \sin \alpha)$$

Здесь a — полуширина потока,

R — средний радиус закругления,

n — число целых поворотов на 90° ;

α — угол сверх целого числа n ;

$m = 4$ для круглого и $m = 3$ для прямоугольного поперечного сечения.

„Формула эта учитывает сопротивления при изгибе потока и пригодна при $R > 4,3 a$; при этом еще не обнаруживается отжима потока“.

Подсчеты для Дальверзинского сброса дают:

$$\xi = \frac{4 \cdot 1,4 \cdot 150^2 \cdot \sin 40^\circ}{(150^2 - 1,4^2)^2 \left(1 - \frac{1,4^2}{3 \cdot 150^2} \right)^2}$$

т. е. $\xi = 0,0241$

По формуле А. Я. Миловича, сокращенной Е. А. Замариным, получаем

$$\xi = \frac{4 \cdot a}{R} \cdot \frac{1}{90} = 0,0166$$

Следовательно потери напора от изгиба равны по формуле Миловича, сокращенной Замариным:

$$h_w = 0,0166 \cdot \frac{4^2}{19,62} = 0,0136 \text{ м}$$

и по полной формуле Миловича

$$h_w = 0,0241 \cdot \frac{4^2}{19,62} = 0,0198,$$

Полученные величины находятся вне пределов точности подсчетов, в обычных условиях и неточность выполнения профиля Дальверзинского сброса оказывает на распределения глубин значительно большее влияние.

¹ «Нерабочий изгиб потока жидкости». Бюллетень Политехнического общества № 10, 1914 г.

Подсчеты потерь от трения на повороте в данном случае вполне возможно производить по формулам потерь напора на прямолинейном участке с учетом влияния шероховатости ложа, т. е. уравнением неравномерного движения. В данном случае, с некоторой незначительной ошибкой возможно воспользоваться уравнением Шези для равномерного режима.

Применение этого уравнения к криволинейному участку в условиях наблюдаемого расхода и последующие определения коэффициентов шероховатости приводят к результатам, совпадающим с подсчетами этих же величин для прямолинейного участка за поворотом.

Значение коэффициентов шероховатости по различным эмпирическим формулам подсчитываем для прямолинейного участка (от 17 до 27-го поперечника).

Результаты подсчетов сводим в таблицу 4, где обозначения приняты те же, что и в предыдущих статьях, а именно

γ —	коэффициент шероховатости в формуле	Базена;
n —	"	Гангильс - Куттера;
n_1 —	"	Маннинга;
n_2 —	"	Павловского

$$Q = 6,91 \text{ м}^3 \text{ сек}; \quad i = 0,007; \quad m = 1$$

Таблица 4

b	h	ω	γ	R	C	γ	n	n_1	n_2
2,78	0,51	1,68	4,21	0,307	77,64	0,076	0,011	0,011	0,011

Оценивая ошибку в определении расхода в $\pm 5\%$, получим:

$\sigma \%$	C	R	γ	n	n_1	n_2
+ 5	81,5	0,397	0,042	0,0109	0,0105	0,0105
- 5	73,7	0,397	0,113	0,0120	0,0116	0,0117

Лотки с различной степенью шероховатости в поперечном сечении

I. Введение

Разработка вопросов расчета турбулентного потока и определении сопротивлений движению за последнее время приобретает все более актуальное значение. Увеличение турбулентности связано с увеличением потерь кинетической энергии и тем самым с уменьшением средних скоростей потока. В гидротехнических сооружениях это достигается увеличением шероховатости русла путем устройства на дне и стенках неровностей, создаваемых в определенных соотношениях к размерам потока.

Благодаря снижению стоимости сооружения, быстротоки с повышенной шероховатостью находят все чаще применение в гидротехнике, в частности в практике ирригационного строительства в Средней Азии.

Однако как физическая сторона явлений, связанных с увеличением турбулентности, так и расчетная техника до сего времени не являются достаточно изученными и разработанными и подлежат дальнейшей проработке.

Что такое гидравлическая шероховатость и от чего зависят потери (сопротивления) при движении потока? Чем объясняется, что при установившемся равномерном движении в призматическом русле коэффициент скорости C в формуле Шези

$$v = C \sqrt{R}, \quad (1)$$

является функцией опять таки скорости и уклона, формы и размеров поперечного сечения потока, а также степени неровностей стенок и дна потока, т. е. их геометрической шероховатости?

Окончательного, точно сформулированного ответа на эти вопросы мы до сего времени не имеем. Тем не менее практическая гидротехника требует конкретных расчетных данных. Эти данные все более и более, особенно за последнее время, накапливаются для гидротехнических сооружений нормальной и повышенной шероховатости. Последнего вида шероховатость все чаще применяется и в Средней Азии, как для гашения энергии по длине лотка быстротока, так и в успокоителе, гасящем энергию за гидротехническим сооружением.

На рис. 1 показан быстроток по проекту для Шариханской системы. На чертеже нанесены горизонты воды, наблюдавшиеся при различных расходах во время просмотра работы модели в 1:200 натуральной величины (ОИИВХ).

На рис. 2 виден один из перепадов Янгидаргомского канала, где собраны и применены довольно разнообразные виды гасителей энергии¹. Фотография относится к 1930 г. Сооружение это, так же как

¹ Следует между прочим отметить, что легко видимую на снимке рис. 2 гребенку следовало бы поставить при сходе с быстротока, а не так, как это сделано. См. работу автора "Результаты исследований консольных перепадов, ч. II."

ШАРИХАНСАЙСКИЙ БЫСТРОТОК.

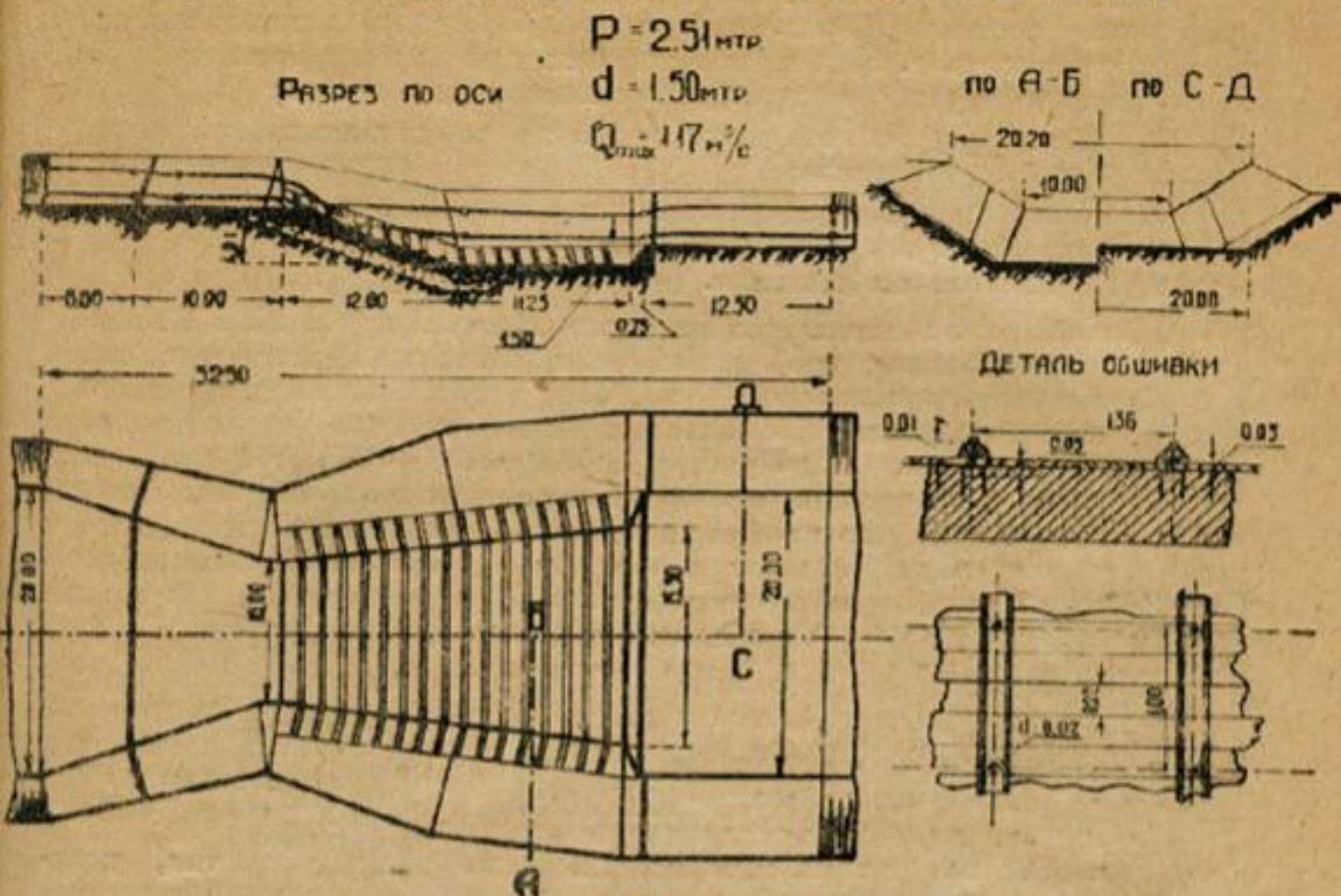


Рис. 1

и ряд других этой системы, исследованы в натуре в 1930-31 г. отрядами Среднеазиатского научно-исследовательского Института.



Рис. 2

II. Общие определения

К настоящему времени экспериментами подтверждены основные положения Ньютона (1686 г.), сводящиеся при определении сил внутреннего трения, т. е. сил, проявляющихся при перемещении слоев жидкости друг по другу, к следующим основным положениям:

1. Силы внутреннего трения прямо пропорциональны относительной скорости перемещения;
2. Прямо пропорциональны величине соприкасания слоев жидкости;
3. Зависят от свойств жидкости;
4. Не зависят от давления.

При этом, как достаточно наглядно показал проф. Н. Н. Павловский,¹ законы Ньютона применимы как к ламинарному движению, так и к турбулентному, при котором слоистости (струйчатости) движения собственно не наблюдается. Сравнительно очень недавно стало известно основное положение Л. Прандтля (L. Prandtl—1904 г.), что всегда имеется зона близ стенок русла, находящаяся в ламинарном движении. Существование же вообще и взаимное различие ламинарного и турбулентного движения экспериментально показаны О. Рейнольдсом (Reynolds) в конце прошлого столетия (1883) для труб, а для открытых русел Хопфом (Hopf) в начале этого века (1910 г.)

Зона ламинарного движения в ближайшем к стенке слое движущегося вообще турбулентно потока весьма мала и, например,² „широкий канал, обделанный слоем бетона в средних условиях при гидравлическом радиусе $R=1$ м, скорости течения $v=3$ м/сек., температуре воды $t=10^\circ$, коэффициенте Шези $C=70$ имеет ламинарный слой $\delta=0,15$ мм $=0,00015$ м“.

При обделке другими материалами русла канала, конечно, получим и другие значения для δ , ибо чем больше неровностей имеет поверхность обделки, тем легче создается турбулентность движения. „Встречая сравнительно незначительные выступы стенок, ламинарный слой может плавно их обтекать; при выступах более значительных обтекающий слой может на низовой стороне (по течению) выступов давать отрывы“³. В этом случае „в пограничном слое закономерности начинают подчиняться иным условиям, уклоняющим связь поверхностного трения со скоростью к квадратичному закону⁴, т. е. к турбулентному режиму, при котором сопротивления пропорциональны второй степени скорости⁵, тогда как при ламинарном они пропорциональны первой степени скорости движения.

Возникающие при этом вихревые и „петлеобразные“⁶ движения усиливают (создают) турбулентность потока и увеличивают потери энергии (сопротивления). Таким образом, по существу нет отличия между

¹ См. проф. Н. Н. Павловский. Гидравлика ч. I стр. 202 и 335.

² Там же стр. 321.

³ Там же стр. 286.

⁴ См. проф. А. А. Саткевич. Аэродинамика, как теоретическая основа авиации. 1923 г. стр. 484. См. об отрыве также в работе проф. Я. А. Палкуева „Механическое подобие в применении к испытанию моделей гидротех. сооруж. в гидравлич. лаборат. Приложение II, том. V Трудов ВНИИГИМ'а, стр. 179.

⁵ Это относится к обычным степеням шероховатости русел. Проф. Карман (Karman, 1924) считает, что турбулентный режим при обычных скоростях и при идеально гладких стенках возможен при степени 1,75, ниже которой не уменьшается. См. проф. Павловский, стр. 244.

⁶ См. „Механизм и теория прыжка потока жидкости“ А. В. Гридук и проф. А. Я. Милевич, в томе VII трудов ВНИИГИМ'а, стр. 99 и др.

сопротивлениями в данном случае „от шероховатости“ и потерями, возникающими при движении струи в массе жидкости¹. Увеличением выступов дна и стенок на некоторых расстояниях друг от друга создается искусственная шероховатость, увеличивающая сопротивление благодаря указанным выше причинам изменения характера движения. При относительно больших размерах этих выступов по сравнению с глубиной, поверхность потока приобретает неровный характер, подобный наблюдаемому на Янгидаргомском быстротоке — перепаде с искусственной шероховатостью, легко видимый на рис. 3.



Рис. 3

Дальнейшее увеличение размеров выступов явится уже переходом к ступенчатым перепадам, где промежутки между выступами будут играть роль колодцев. Действительно, модели 19-ступенчатого варианта Бурджарского перепада при больших расходах во время пропуска воды несколько напоминали быстротоки повышенной шероховатости².

III. Опытные данные и расчетные формулы Базена, Винкеля и др.

Опытные данные исследований, накапливаемые в течение значительного периода времени, постепенно способствуют выяснению значения коэффициента Шези C в формуле (1) равномерного режима, считавшегося в середине прошлого века постоянным и равным $C=50$.

Давая (1775 г.) свою формулу, Шези (Chezy) также считал, что коэффициент C есть величина постоянная, не зависящая от рода (материала) стенок; это неверное предположение было оставлено после работ Дарси (1857), доказавшего, что шероховатости материала стенок и дна русла влияют на сопротивления при движении. Материал русла (смоченного периметра) почти не влияет на сопротивления лишь при ламинар-

¹ См. выпуск 10 трудов САНИИРИ. Работы Н. И. Теперина и М. С. Вязго.

² Опыты Ср. Аз. Института в 1925 г. (ГИИ). Сравните Спец. приемы погашения энергии ниже В. Д. Журия. Испытания в лаборатории были проведены на моделях $1/100$, $1/20$ и $1/11$ nat. величин проекта перепада.

ном (струйчатом) режиме, при чем сопротивления пропорциональны первой степени скорости (закон Пуазейля, 1840).

$$i = \frac{h_w}{L} = \frac{32}{g} \cdot \frac{\nu \cdot v}{D^3} = \frac{2 \cdot \nu}{g R^2} = K \cdot v.$$

Как уже выше отмечено, различие между ламинарным и турбулентными режимами было выяснено Рейнольдсом, подтвердившим опытами свои теоретические¹ рассуждения (1879), основанные на методе размерности и механического подобия. При этом Рейнольдсом установлена зависимость критической скорости перехода одного режима движения в другой в виде показательной зависимости:

$$v_{кр} = N_{кр} \cdot \rho^{\alpha} \cdot \mu^{\beta} \cdot R^{\gamma} = \frac{\mu}{\rho \cdot R} \cdot N = \nu \cdot \frac{N}{R},$$

где $N_{кр}$ — некоторый постоянный коэффициент при постоянной форме поперечного сечения потока (труба) и постоянной шероховатости (неровности) стенок (стекло, свинец);

ρ — плотность жидкости (масса единицы объема);

μ — коэффициент вязкости жидкости (сила трения, приходящаяся на кв. единицу поверхности);

R — гидравлический радиус;

$\alpha = -1$ } — показатели степеней, числовые значения которых выво-
 $\beta = +1$ } дятся при применении метода размерности;

$\gamma = -1$ }

ν — кинематический коэффициент вязкости, имеющей размерность:
 длина $\times$ скорость

Число $N_{кр}$ равно

$$N_{кр} = \frac{R \cdot v_{кр}}{\nu}$$

называется критическим числом Рейнольдса, при чем это число безразмерно.

При турбулентном режиме потери (сопротивления) прямо пропорциональны квадрату скорости.

$$i_1 = K_1 \cdot v^2 = \frac{1}{B \cdot R} \cdot v^2 = \frac{1}{C^2} \cdot \frac{v^2}{R}$$

Так как скорость на границе ламинарного слоя при турбулентном режиме равна скорости турбулентной части потока, то и потери на границе этих слоев должны быть равны, а поэтому

$$i = i_1; K v_{кр} = K_1 v_{кр}^2 = \frac{1}{C^2} \cdot \frac{v_{кр}^2}{R}$$

откуда

$$\frac{1}{B} \cdot \frac{v_{кр}^2}{R} = \frac{2 \cdot \nu}{g R} \cdot v_{кр}$$

или

$$\frac{R \cdot v_{кр}}{\nu} = \frac{2 B}{g} = \frac{C}{g} = N_{кр}$$

т. е.

$$C = \sqrt{\frac{N_{кр}}{2}}$$

Таким образом, коэффициент Шези C пропорционален числу Рейнольдса.

¹ См. проф. Т. Пези, Курс гидравлики, стр. 65-75 русского перевода, изд. 1931 г. См. также проф. Шапокин, "Гидравлика", стр. 222.

Поэтому, например, Р. Винкель,¹ следуя работам Крся и Эйснера, для коэффициента Шези даст зависимость

$$C = B_1 \cdot F \left(N; \nu; \xi; \frac{1}{R} \right)$$

где B_1 — коэффициент, характеризующий влияние формы поперечного сечения потока, для одних и тех же поперечных сечений B_1 остается постоянным;

ξ — фактор, характеризующий влияние шероховатости стенок. Полагая зависимость F степенной, получаем

$$C = B_1 \cdot (N \cdot \nu)^n \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^m$$

и подставляя в уравнение (1) имеем

$$v = B_1 (\nu \cdot N)^n \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^m \sqrt{R \cdot i}$$

откуда

$$v = B_1 \cdot \left(\frac{v \cdot R \cdot \nu}{v} \right)^n \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^m \sqrt{R \cdot i}$$

$$v = B_1^{\frac{1}{1-n}} \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^{\frac{m}{1-n}} \cdot R^{\frac{0.5+n}{1-n}} \cdot i^{\frac{0.5}{1-n}}$$

или

$$v = B_1^a \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^b \cdot R^c \cdot i^d = A \cdot R^c \cdot i^d$$

при чем a, c, b и d связаны зависимостью $a = 2d$; $b = 2d \cdot c$; $c = 3d - 1$, где $d = \frac{0.5}{1-n}$; Винкель, анализируя некоторые материалы исследований германских рек, получил

$$v = A \cdot R^{0.715} \cdot i^{0.572} = A \cdot R^{\frac{5}{7}} \cdot i^{\frac{5}{7}}$$

т. е. им получено значение $n = 0,125 = \frac{1}{8}$

Здесь по Винкелю

$$A = B_1^{\frac{1}{1-n}} \cdot \left(\frac{\xi}{R} \right)^{\frac{m}{1-n}}$$

Кроме того, величина A может быть выражена зависимостью

$$A = 185 - 210 i^{\frac{0.5}{7}}$$

при чем оговаривается, что эта формула применима для ручьев и рек с уклонами $i = 0,00007$ до $0,005$ и даст в среднем расходимость с фактическими наблюдениями около 4% .

В цитируемой работе проф. Палкуева приведен также и ряд других данных различных исследований, при чем данные относятся к руслам различной шероховатости от вполне гладких стенок до лотков с искусственной шероховатостью.

В таблице 1 приведены эти данные, при чем легко видеть, что для случаев 1, 2, 6 и 7 показатель имеет значение $n = \frac{1}{8} = 0,125$.

¹ Цитировано по проф. Палкуеву, см. VII том трудов ВНИИГИМ, 1932 г. стр. 175.

При обычном коэффициенте шероховатости по Г. К. $n = 0,023$. См. Палкуев, стр. 180.

№	Описание	A	C	D	S	n	Примечание
1	Гладкие стенки (идеальное состояние)	202	0,715	0,572	104	0,126	При этом наблюдалось, что $R = \frac{1}{2}h$, где h глубина потока
2	В трубу с гладкими стенками вставлен стержень с выточками по схеме III (фиг. 4)	182	0,715	0,572	95	0,125	
3	Опыты Scobey с трубами деревянной клепки	122	0,660	0,556	78,8	0,094	При этом $R = h$, как указано на схеме см. фиг. 5
4	Исследования Випкеля: стержень, вставленный в трубу, имеет кольцевые выступы по схеме I	90,6	0,667	0,553	57,9	0,100	здесь разм. в см.
5	То же по схеме II	84,1	0,576	0,530	53,0	0,105	
6	Исследования Базена: деревянный лоток с планками по схеме IV	112	0,715	0,572	62,0	0,126	
7	Исследования Базена: деревянный лоток с планками по схеме V	71,6	0,715	0,572	42,1	0,126	
8	Акгазинский быстроток; закругленные планки по схеме VI	70	0,715	0,512	41	0,125	

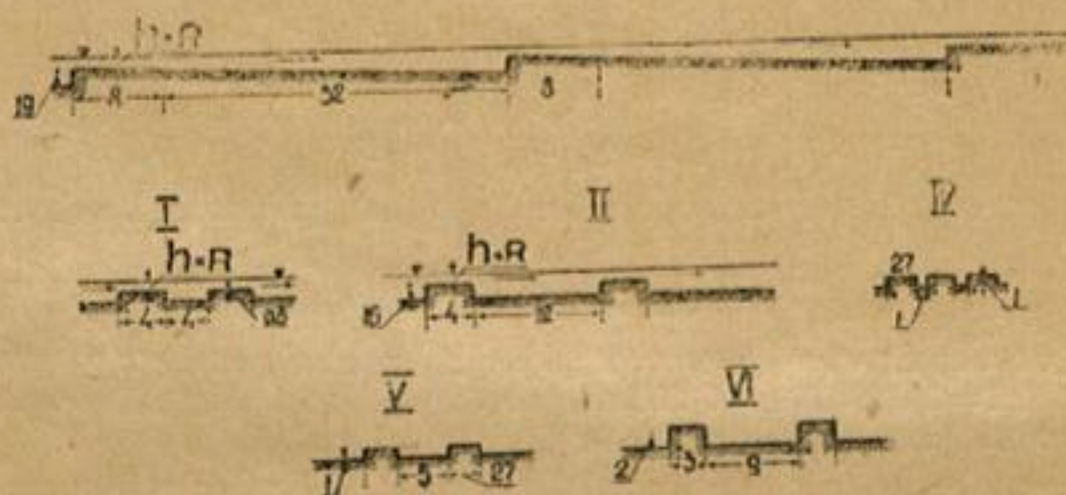


Рис. 4

Построенные по этим данным кривые в координатах (vR) и $\left(C = \frac{vR}{V_{R0}}\right)$ показывают, что величина C , начиная со значения $v \cdot R = 0,5$, быстро падает для величин меньших 0,5 и с несколько меньшей интенсивностью поднимается для значений от 0,5 до 4. Дальнейшее увеличение $(v \cdot R)$ происходит при незначительном изменении C .

кривая полого растет вверх и может быть принята за кривую с небольшим под'емом.

Из этого следует, что „уменьшая размеры частей гидросооружений (например) ниже $v. R = 0,5$, мы значительно понижаем скорость, доводя значение C формулы Шези почти до 5 и ниже (для $R. v.$ в сотых долях единицы); наоборот, в большом канале (например, судоходном) с большим значением величины $R. v.$, при большой даже степени шероховатости в виде искусственных ребер на дне — нельзя значительно уменьшить скорость, не доводя размеров ребер до слишком большой величины.

IV. Исследования на Янги-даргоме и лабораторные опыты с Акгазинским быстротоком

Действительно, обращаясь к исследованиям, проведенным Институтом на быстротоке повышенной шероховатости на Янги-даргоме (см. статью Вызго и Дмитровского в этом сборнике) видим, что с увеличением глубин влияние шероховатости (ребер) уменьшается. Принимая значение показателя $n = 0,125 = \frac{1}{8}$, найдем значения коэффициентов A и S

$$v = A. R. i^d; C = S (v. R)^n$$

где $d = \frac{0,5}{1-n} = 0,572 = \frac{4}{7}$ и $s = 3d - 1 = 0,715 = \frac{5}{7}$

Янги-даргом, $i = 0,045$, $b = 12,00$ м.

Таблица 2

№	Q	Н _{ср}	R	C	v	v. R	A	$S = \frac{C}{(v. R)^{0,125}}$
1	65,1	0,79	0,710	35,97	6,40	4,54	48,2	29,78
2	33,5	0,68	0,619	23,26	3,85	2,38	32,0	20,80
3	28,9	0,63	0,577	22,57	3,60	2,08	31,9	20,59

В этой таблице глубина (и все другие величины) приняты без учета высоты ребра, равной 5 см. Относя расчеты к скорости в сечении над планкой, т. е. уменьшая $H_{ср}$ на 0,05 м, получаем таблицу 3.

$$i = 0,045; m = 1; b = 12,10$$

Таблица 3

№	Q	h	R	C	v	v. R	A	S
1	65,1	0,74	0,619	41,01	6,86	4,68	53,8	33,0
2	33,5	0,63	0,578	25,97	4,17	2,41	36,3	23,1
3	28,9	0,58	0,537	25,31	3,93	2,11	36,2	23,4

Если обратиться к сопоставлению наблюдений¹ за рейками в 1930 и 1931 г. на одном и том же створе канала — и ввести соответственные коррективы, то получаем следующую таблицу

$$i = 0,045; b = 12,10$$

Таблица 4

№	Q	h	R	C	v	v. R	A	S
1	60,0	0,74	0,66	20,8	6,30	4,22	49,5	24,8
2	37,5	0,63	0,578	23,6	4,67	2,70	40,7	20,9
3	27,5	0,58	0,535	19,6	3,73	2,00	34,4	18,5

Полученные значения A и S не дают возможности утверждать, что в данном случае эти величины постоянны, т. е. значение $n = \frac{1}{8}$ здесь не удовлетворяется.

В нашем распоряжении имеются еще материалы исследований Института по опытам в лаборатории, произведенным по заданию Средазводпроиза для разработки вариантов нахшихских ирригационных сооружений (вариант сброса на 25-м километре магистрального канала).² Число отдельных опытов достигает 211, при чем исследовано пять типов шероховатости дна, а именно:

- 1) зубья (ступени) с наклоном по течению;
- 2) то же против течения;
- 3) планки с острыми краями;
- 4) то же с закругленными краями;
- 5) шашки в шахмат.

Опыты разбиты на ряд серий в зависимости от уклона дна лотка а именно:

Серия	Уклон
A	9%
B	4%
C	12%
D	16%

Каждая серия содержит несколько классов, различаемых по типу и степени (высота зубца) шероховатости

Для каждого класса, кроме VII, менялась ширина лотка (прямоугольного поперечного сечения), при чем $b_1 \cong 30$ см; $b_2 \cong 24$ см; $b_3 \cong 18$ см.

¹ Сопоставлены данные эксплуатационного штата для расходов в 1931 г. и данные 1930 г., когда измерения расхода производились отрядом Института (под начальством Г. С. Чулуасва). Это сопоставление заставляет считать желательным произвести еще некоторые измерения, в частности при $Q \cong 83$ м³/сек., а также повторные.

² Исследования произведены инж. Герке Е. А., инж. Оболенским С. Н. и инж. Волковой Г. А. под общим руководством проф. Е. А. Замарина.

Таблица 5

Класс	Т и п	Степень	Число опы- тов
I	Зубья против течения	d = 2 см	26
II	То же	1,2 "	31
III	Зубья по течению	2 "	67
IV	То же	1,2 "	31
V	Ребра (планки) с ост- рыми краями	2 (2 — 3)	20
VI	То же с закругл. краями	2	26
VII	Гладкое дно	—	5
VIII	Шашки в шахмат	2	6

В некоторых опытах деревянные стенки (гладко остроганные доски) обивались жестью с целью выявления влияния шероховатости стенок.

Опыты были проведены при различных расходах воды в пределах от $Q_{\min} = 8$ литров в секунду до $Q_{\max} = 70$ л/сек. Общая длина лотка $L = 7,0$ метров.

При измерениях по всей длине лотка разбивались створы таким образом, чтобы они приходились над гранью зубцов или посредине планки. Всего было 12 створов. На каждом створе измерялись глубины в 3 точках — две у бортов и одна посредине лотка, по вертикали над зубцом или осью планки¹. На каждой вертикали делалось три отсчета — дно, вышний горизонт и низший горизонт. Для определения средней глубины по вертикали принимались средние значения из 2 отсчетов.

В своем рассмотрении ограничимся сравнением результатов опытов V, VI и VII классов, по которым, кроме того, возможно осуществить сравнение с данными, приведенными в таблице 1 этой работы. При пользовании материалами будем считать, что во время опыта в некоторой средней части по длине лотка (участок $\approx 2,5$ м устанавливается равномерный режим. В данном случае это, повидимому, возможно допустить без больших погрешностей, тем более, что точность вычислений по уравнениям неравномерного движения в случае их применения здесь не будет соответствовать точности измерений. При этом еще надо иметь в виду, что в лотке не наблюдается зеркально гладкой и ровной поверхности, подобно тому, как это видно из рис. 3 (фото Янгидаргомского быстротока повышенной шероховатости).

Результаты наблюдений сведены в таблицы 6, 7 и 7-а, при чем глубины h являются средними на участке равномерного режима в средней части лотка, примерно на длине 2,5 м, при общей длине лотка около 7 м⁴. Значения v в таблице соответствуют значению

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{Q}{b \cdot h}$$

где b — ширина лотка, а h — средняя глубина над планками в указанном участке лотка.

¹ Для полноты исследования необходимо производить замеры и между ребрами или планками.

Гладкое дно; $b = 0,303$ м; $i = 0,091$; $V 0,091 = 0,300$

Таблица 6

№ опыта	Q	v	a	R	γ	v. R	ω	$(v. R)^{1/3}$	C	A	S
19	0,050	2,94	5,60	0,0410	0,415	0,121	0,0170	0,768	48,51	114,0	63,16
23	0,010	2,94	4,50	0,0346	0,393	0,102	0,0136	0,752	52,69	128,9	70,07
22	0,010	3,08	4,30	0,0334	0,389	0,103	0,0130	0,753	56,10	138,1	74,50
20	0,030	2,75	3,60	0,0291	0,375	0,080	0,0109	0,729	53,61	136,1	73,54
21	0,018	2,43	2,45	0,0210	0,352	0,051	0,0074	0,689	55,86	152,8	81,07

Панки с острыми краями (V класс)

Таблица 7

Уклон	0,0583	583	587	592	587	583	588	584	900	935	924	924	900
Ширина b	21,2				30,5				24,05				
№№ опытов	62	63	64	65	58	59	60	61	51	55	52	53	54
Расход Q л/сек	50,0	41,7	30,1	20,2	60,7	50,3	33,9	20,9	41,6	30,4	30,0	22,8	18,0
Глубина h	10,9	9,6	7,4	5,5	11,0	9,5	7,3	5,1	9,2	7,4	7,4	6,1	5,2
Скорость v	1,90	1,80	1,68	1,54	1,82	1,74	1,53	1,35	1,88	1,71	1,67	1,56	1,43
R	0,0574	534	459	378	640	586	494	383	521	459	459	403	363
C	32,70	32,32	32,43	32,70	29,74	29,84	28,49	28,48	27,48	26,11	25,65	25,53	25,09
v. R	0,1091	0,0963	0,0771	0,0582	0,1165	0,1020	0,0756	0,0517	0,0979	0,0785	0,0767	0,0629	0,0389
$(v. R)^{0,125}$	0,758	0,746	0,725	0,701	0,761	0,751	0,724	0,690	0,748	0,727	0,725	0,708	0,697
A	74,22	74,07	77,06	80,63	65,70	65,41	66,81	70,31	61,64	61,73	59,43	60,23	60,85
S	43,14	43,32	44,73	46,65	38,93	39,79	39,35	41,28	36,74	35,91	35,38	36,06	36,07
$S_{\Sigma} =$	44,5				40,0				36,0				

Закругленные планки (VI класс)

Таблица 7-а

Уклон	6 % (0.0596)						6 % (0.0596)			9 % (0.0894)		
Ширина	30 см						24,1 см			24,1		
№ № опыт.	184	183	180	182	181	185	189	188	189	201	198	194
Расх. Qл/с	20,2	30,3	40,0	41,0	60,3	70,4	17,9	25,0	49,9	18,0	20,0	29,8
Глуб. лем	4,7	6,5	7,8	7,9	10,5	11,9	5,0	7,0	11,3	4,33	4,92	6,54
Скор. км/сек	1,43	1,56	1,70	1,72	1,91	1,97	1,47	1,48	1,84	1,73	1,70	1,90
R*	0,036	0,045	0,052	0,052	0,062	0,066	0,0363	0,0444	0,0582	0,0318	348	423
C	30,82	30,00	30,41	30,77	31,41	31,42	32,24	28,74	31,29	32,52	30,58	30,84
v. R	0,0315	702	884	891	1184	1300	534	637	1071	0,0550	592	804
(v. R) ^{0,128}	0,690	717	738	740	766	774	693	711	756	0,696	702	730
A	71,30	71,89	70,54	71,37	69,96	69,12	79,03	68,84	70,50	81,22	74,89	72,80
S	44,67	41,84	41,20	41,58	41,00	40,59	46,52	39,02	41,39	46,72	43,56	42,25
S ср. = 41,59						42,0			42,0			

Продолжение табл. 7-а

Уклон	9 % (0.0894)						1 % (0.118)						
Ширина	24,1						24,1						
№ № опыт.	200	202	205	201	203	194	192	195	196	191	193	197	190
Расх. Qл/с	40,5	40,0	49,8	60,7	60,2	19,6	25,0	25,0	30,3	40,0	19,3	60,1	60,5
Глуб. лем	8,28	7,96	9,45	11,08	11,09	4,4	5,5	5,7	6,0	7,6	9,1	10,2	10,4
Скор. км/с	20,4	2,08	2,08	2,28	2,28	1,83	1,88	2,00	2,00	2,19	2,24	2,43	2,41
R	491	481	531	579	579	322	379	362	402	466	518	553	559
C	30,72	31,76	31,55	31,63	31,62	29,56	28,02	30,58	30,25	29,18	28,57	30,07	29,68
v. R	1002	1000	1158	1820	1820	589	713	724	840	1021	1160	1344	1347
(v. R) ^{0,128}	750	700	764	777	777	702	718	720	734	752	763	778	778
A	70,10	72,73	70,55	69,94	69,94	72,62	66,43	72,99	71,09	65,37	62,92	65,68	64,61
S	40,96	42,35	41,30	41,69	40,69	42,10	31,02	42,47	41,21	39,20	37,44	38,65	38,14
42,0						40,0							

Так же как и в отношении исследований на Янги-даргоме, здесь приходится отметить, что A и S не являются строго постоянными величинами, хотя для закругленных планок постоянство почти выдерживается ($A \approx 70$, $S \approx 40-42$). Но здесь, как легко видеть, и значение коэффициента Шези C почти постоянно ($C \approx 30$).

Необходимо отметить, что полученные результаты — значения A и S, вполне согласуются с другими исследованиями. (См. таблицу 1).

V. Число Рейнольдса и абсолютная шероховатость Мизеса

Теоретически математическую зависимость между сопротивлением движению и числом Рейнольдса при турбулентном режиме гидравлики пока еще не удалось вывести, почему эти зависимости и имеют разный полу-эмпирический характер. Так, для труб известна формула Lang'a

$$\lambda = \frac{0.0018}{\sqrt{v D}} + \alpha$$

(в формуле $i = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$), при чем α зависит как от вязкости жидкости, так и от материала стенок.

Формула Фламан (Flamant) (1892) имеет вид

$$\lambda = \frac{\alpha}{\sqrt{v D} \cdot 2g}$$

где α также зависит от вязкости жидкости и от материала стенок гладкой трубы (преимущественно смачивание).

Формула Мизеса (Mises) для труб с шероховатыми стенками имеет вид

$$\lambda = 0.01 + \sqrt{\frac{K}{D}} + 1.77 \sqrt{\frac{v}{v \cdot D}}$$

Здесь величина K — „абсолютная шероховатость“ (в метрах). Значения K приведены в таблице 8.

Таблица 8

№	М а т е р и а л	$10^8 K$	Примечание
1	Стекло	от 6,4 до 25,6	См. проф. Цепель.
2	Тянутое латунь, свинец, медь . . .	6,4 — 32,0	Курс гидравлики
3	Цемент шлифованный	240 — 480	Изд. 1931 г. стр. 81
4	„ — обработанный	640 — 1280	
5	Резиновые рукава	200 — 960	
6	Железо	640 — 1600	
7	Асфальтированное железо и чугун .	950 — 1900	
8	Чугун, новые трубы	3200 — 6400	
9	„ — старые	6000 — 16000	
10	Жесть	6400 — 16000	
11	Дерево	1600 — 32000	
12	Каменные стены	6400 — 12000	
13	Скала, Бутовая кладка	64000 — 120000	

Как легко видеть, в эти формулы значение ($v \cdot K$) входит в различных степенях

0,5 — Ланг и Мизес;

0,25 — Фламан, Винкель.

Рассматривая формулу Штриклера¹

¹ Инж. П. В. Михеев «Анализ и систематизация расчетных формул равномерного движения жидкости при параллельном анализе опытных данных», доклад в мае 1927 г. Водопроводному съезду в Харькове. См. Труды второго всесоюзного (XIV) водопроводного и санитарно-техн. съезда. Выпуск 2, ч. II. Москва 1931 г.

$$J = \frac{v^2}{K_0^2 R^{4/3}} + \frac{2\pi \nu}{R^2} v - \left(\frac{200 \nu g}{4K_0} \right)^2 \frac{1}{R^{3.25}}$$

или

$$J = v^2 \left(\frac{1}{K_0^2 R^{4/3}} + \frac{2\pi \nu}{R(R \cdot v)} \right) - \left(\frac{200 \nu g}{4K_0} \right)^2 \frac{1}{R^{3.25}}$$

видим, что здесь Рейнольдсово число входит в первой степени.

Все это ясно показывает, что до сего времени не имеется вполне обоснованного подхода к определению зависимости сопротивлений от числа Рейнольдса.

VI. Формула Штриклера

Как уже указывалось, в формулу Мизесса входит „абсолютная шероховатость“, выражаемая в метрах.

В формуле Штриклера геометрическая шероховатость, неровность русла, входит в величину K_s .

$$K_s = \frac{21,1}{\sqrt{\delta}} = \frac{\chi}{\sqrt{\delta}}$$

Здесь δ — средняя глубина неровностей русла, очевидно, отнесенная к некоторой протяженности по длине потока (например, 1 метр).

Пренебрегая третьим членом, т. е. пользуясь сокращенной формулой Штриклера, будем иметь

$$J = \frac{v^2}{K_0^2 R^{4/3}} + \frac{2\pi \nu}{R^2} v$$

откуда

$$K_0^2 = \frac{v^2}{\left(J - \frac{2\pi \nu v}{R^2} \right) R^{4/3}}$$

По наблюдениям на Янги-даргоме получаем

Таблица 9

№	ν	R	K_0^2	K_0	χ	Примечание
	6,30	0,669	1500	38,8	65,7	$2\pi \nu = 7,54 \frac{1}{10}$
2	4,67	0,578	1000	31,6	55,2	Поэтому в виду малости второго члена в сокращенной формуле Штриклера мы также можем в данном случае пренебречь
3	3,73	0,535	705	26,6	46,4	

Здесь принято $\nu = 0,012 \frac{1}{10}$ и $i = 0,045$

$$\delta = \frac{0,05 \times 100}{6 \frac{140}{\sqrt{0,0317}}} = 3,47 \text{ см.}$$

Таким образом, величина χ для одного и того же быстротока при различных наполнениях не является величиной постоянной.

VII. Опыты Дениля и приведенная шероховатость

Как известно, инж. Дениль¹ на основании своих опытов с лотками искусственно повышенной шероховатости, предложил учитывать сопротивления формулой

$$B = \frac{1}{C^2} = 0,0214 + \frac{0,00084}{R}$$

т. е.

$$C = \sqrt{\frac{1}{B}} = \sqrt{\frac{1}{0,0214 + \frac{0,00084}{R}}}$$

При этом Дениль считал эту формулу пригодной для следующих соотношений размеров потока

$$\begin{aligned} \text{глубина } h &= 3 - 4 \delta; \\ \text{ширина } b &= 3 - 4,8 \delta; \\ \text{расстояние между зубцами } l &= 4,5 - 2 \delta \end{aligned}$$

Форма зубьев криволинейного очертания.

Сопоставляя эту формулу с f_0 „приведенной шероховатостью“ Кешаи² или „эффективной шероховатостью“ по терминологии проф. Н. Н. Павловского, получаем

$$C = \sqrt{\frac{1}{B}} = \sqrt{\frac{2g}{f_0}}$$

видим, что

$$B = 2g f_0$$

Так как понятия „приведенной“ или „эффективной“ шероховатости основаны на старых воззрениях гидравликов³, то формулы вида Дениля не могут быть признаны годными к пользованию. Действительно, эти формулы основаны на упрощенном предположении, что частица жидкости, встречая на своем движении выступы (неровности, геометрическую шероховатость) стенки или дна, отклоняется от своего основного направления, а иная также останавливается и теряет при этом часть или полностью свою живую силу. Потеря энергии при таком рассмотрении получается равной

$$E = \frac{\sum a}{R} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

где $\sum a$ — сумма выступов a ;

a — высота выступа, средняя для данного поперечного сечения (геометрическая шероховатость).

Так как потери энергии относят при таком рассмотрении к „сопротивлению на стенке“, то

$$E = \frac{\tau}{\Delta} \cdot \frac{l}{R} \quad \text{или} \quad \frac{\tau}{\Delta} = E \frac{R}{l}$$

¹ См. В. И. Чарномский „О лотках и каналах прямоугольного сечения усиленной шероховатости“. Материалы Водохозяйств, в. 2.

² См. проф. Н. Н. Павловского. Гидравлика. ч. I, стр. 271.

См. там же.

где l — длина участка;

R — гидравлический радиус;

τ — сопротивление, приходящееся на единицу смоченной поверхности, отнесенное к удельному весу жидкости. Поэтому в основном уравнении равномерного режима¹

$$\frac{\tau}{\Delta} = -R \cdot I$$

при таком рассмотрении получается

$$\frac{\tau}{\Delta} = -\frac{\Sigma a}{l} \cdot \frac{v^2}{2g} = -f_0 \cdot \frac{v^2}{2g}$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2g}{f_0}} \cdot \sqrt{R \cdot I} = C \sqrt{R \cdot I}$$

т. е.

$$C = \sqrt{\frac{2g}{f_0}}$$

где

$$f_0 = \frac{\Sigma a}{l}$$

Это дает право считать f_0 за некоторую фиктивную геометрическую шероховатость, сосредоточенную через 1 метр ($l = 1$ м) и выражающуюся некоторой линейной мерой — высотой стенки (выступа) и поперечном сечении.

При таком рассмотрении, казалось бы, возможно подсчитать сопротивления в шероховатом русле, если известны сопротивления гладкого русла из того же материала и величин выступов искусственной шероховатости, т. е.

$$f_0 = f' + \frac{\Sigma \zeta}{l}$$

где f' — подсчитанные значения приведенной шероховатости гладкого русла.

Однако, в достаточной мере очевидно, что величина разности $(f_0 - f')$ не будет равна действительной геометрической шероховатости $\frac{\Sigma \zeta}{l}$, ибо потери энергии обуславливаются наличием вихревых движений, вызываемых выступами.

Легко в этом убедиться и простыми подсчетами. Некоторые подсчеты приведены в таблице 10 для условий опытов в лаборатории с лотками Акгазинского быстротока.

Острые ребра; $b = 24,1$ см; $i = 6\%$

Таблица 10

h	ω	γ	R	f'	f_0	$\Delta_{\text{см}}$
5	0,01206	0,311	0,0353	0,60	2,16	11,7
7	0,01687	0,331	0,0440	0,56	2,00	10,5
9	0,02169	0,421	0,0516	0,53	1,90	9,5
11	0,02651	0,461	0,0575	0,51	1,84	8,7

¹ Проф. Бахметев Б. А. Равномерное движение жидкости в каналах и трубах стр. 1. Бахметев, Гидравлика, ч. I, § 31. проф. Пандовский, Гидравлика, § 43.

Здесь

$$a = \frac{\lambda \cdot L}{l} \cdot \frac{b}{\chi} = \frac{2 \cdot 1}{0,12} \cdot \frac{0,241}{\chi}$$

$$f = \frac{100 \cdot 2g}{C^2} = \frac{10^3 \cdot 2g}{\left(\frac{1}{n_1} R^{1/6}\right)^2} = \frac{100 \cdot 2g \cdot n_1^2}{R^{1/3}}$$

Считая C по Маннингу и вводя значения n_1 для гладких стенок (класс VII) $n_1 = 0,010$, для случая¹ с планками $n_1 = 0,019$ получаем значения f' и f_0 , при чем разность их не равна приведенной геометрической действительной шероховатости. Поэтому метод этот не может быть практически применяем.

Опыты Дениля, однако, дали возможность установить весьма важное обстоятельство: в некоторых пределах изменений глубин значение коэффициента Шези C остается почти постоянным².

Очевидно, постоянство величины C не может соблюдаться при больших диапазонах глубин для одного и того же русла. Подтверждение этому — получаемые из наблюдений данные.

VIII. Влияние глубины

Практическая гидротехника, требуя от гидравлики достаточной точности, удовлетворяется обычно, применяя приблизительные эмпирические формулы, из которых наиболее распространены формулы Базена, Маннинга и Гангилье-Куттера.

Эти формулы, не полностью удовлетворяя стремлению найти общее решение задачи, требуют учета геометрической шероховатости введением «коэффициентов шероховатости», определяемых опытным путем. Значения этих коэффициентов постоянно уточняются, что вносит некоторые поправки в табличные значения этих коэффициентов.

Сравнительная простота пользования этими формулами и достаточная степень их точности способствовали распространению их в практической работе, тем более, что строго теоретической формулы пока еще не имеется. Структура этих эмпирических формул подобрана так, что для русел из одного и того же материала в некоторых пределах формы и размеров их поперечного сечения значения коэффициентов шероховатости сохраняются постоянными³.

Для лотков усиленной шероховатости, как мы уже и раньше убедились (§ III—IV), сопротивления остаются постоянными лишь в узких пределах изменения глубины, с возрастанием расхода влияние ребер уменьшается.

То же явление наблюдается и в ряде других случаев наличия повышенной шероховатости.

Например, как известно,⁴ на плотоходе между Лауцой и Западной Двиной, построенном на Элернском сплавином пути, при ширине $b=2,66$ м и уклоне $i=0,03$ усиленная шероховатость осуществлена хво-

¹ См. черт. 6.

² Эта закономерность, как легко видеть из таблицы 1, также наблюдалась и в опытах с быстротоком при разработке варианта Акгалинского сброса.

³ Влияние размеров потока легко усматривается из таблиц XII и XIII, приведенных в книге проф. Б. А. Бахметева «О равномерном движении жидкости в каналах и трубах». Изд. 1931 г. Ленинград. См. выдержку из этих таблиц в статье № 2 этого сборника.

⁴ См. «Ассосиальные лотки» инж. С. Я. Жук. См. также В. Д. Журич «Специальные приемы погашения энергии в перепадах и быстротоках», 1927 г., а также проф. Ахутин А. Н. — «Рабочая книга по специальному курсу гидравлики», 1931 г.

ростяными барьерами высотой $d=0,5$ м через $l=4,25$ м между осями. При этом устройстве при расходе $Q=6,55$ м³/сек. шероховатость в формуле Базена оценивается коэффициентом $\gamma=2,92$, тогда как при $Q=1,18$ $\gamma=9,36$.

Второй пример. В № 4 Известий научно-исследовательского института гидротехники (НКТП СССР Энергоцентр) кратко сообщены результаты наблюдений по определению коэффициентов шероховатости сплавных рек с валунистым ложем Средней Корелии¹. Произведенные 50 измерений (всегда $i > 0,005$), разбиты на три группы:

1. Пороги в естественном состоянии h = от 62 см до 32 см;
 n = от 0,0511 до 0,2008;
 γ = от 4,64 до 15,59,
 при чем для $h=50$ см $n=0,087$, $\gamma=6,15$

2. Пороги мелиорированы (расчищены от наиболее крупных камней);
 h = от 60 до 20 см.
 n = от 0,0389 до 1,480
 γ = от 2,18 до 10,88
 при чем для $h=45$ см, $n=0,059$; $\gamma=3,60$

3. Корешки, характеризующиеся меньшими уклонами, сравнительно малым количеством камней и менее бурным течением, чем на порогах

при $h=45$ см... $n=0,040$ $\gamma=2,17$

Построенные на основании полученных наблюдений кривые зависимости $n=f(h)$ все имеют изменение n при изменении h , а именно с возрастанием глубины коэффициент шероховатости уменьшается. В этой статье не указаны размеры камней. Общий характер кривых таков: участки каждой кривой для малых глубин резко повышаются, чрезмерно увеличивая коэффициент шероховатости, в то время как участки кривых для больших глубин медленно и постоянно понижаются. „Кривые для порогов в естественном состоянии (по сравнению с мелиорированными участками) показывают, что влияние дна на них сказывается при значительно больших глубинах, что вполне естественно, так как здесь крупные камни из русла не убраны“.

Третий пример. Проф. Е. А. Замарин приводит² следующую таблицу значений коэффициентов шероховатости по опытам Дениля (с некоторым уточнением таблицы, приведенной у Чарномского).

№	Глубина h	Коэф. Шен C	Коэф. шероховатости	
			Базен γ	Манинг n
1	0,240	10,3	2,68	0,039
2	0,347	11,0	2,74	0,037
3	0,397	11,8	2,64	0,033
4	0,470	13,8	2,23	0,055

Построенный рыбоход системы Дениля длиной 6,08 м на плотине Д'Англера, имея $b=60$ см, $d=20$ см, $l=50$ см, при глубине $h=50$ см создавал равномерное течение, при чем уклон $i=\frac{4}{7}=0,57$ и коэффициент шероховатости $\gamma=5,80$.

¹ См. статью ниже А. Н. Малявкина «О коэффициентах шероховатости пороженных участков рек».

² См. Гидротехнические сооружения, т. 1, 1932 г. Сравните с работой Чарномского.

Пример четвертый. В статье № 3 этого сборника приведена таблица значений коэффициентов шероховатости, вычисленных по различным формулам на основании наблюдений на Янги-даргоме (см. таблицу 8).

Проф. Е. А. Замарин, отмечая, что в опытах Дениля глубины были $h < 3d$ и даже $h < 2d$, считает, что при такой незначительной глубине движение по лотку приближалось к движению через ряд небольших перепадов, а не к сплошному движению „по быстротоку“. Достигнуть на лотке с усиленной шероховатостью вполне гладкой свободной поверхности воды, поверхности без некоторых впадин и подъемов, вероятно, вообще трудно, если стремиться получить сравнительно большие значения для коэффициента шероховатости. На рис. 3 видны неровности при расходе $Q \cong 20 \text{ м}^3/\text{сек.}$, $h \cong 50 \text{ см.}$, т. е. при $\frac{h}{d} \cong \frac{50}{5} \cong 10$ — 3. Правда, в данном случае расстояние между ребрами в свету велико ($l = 100 \text{ см.}$). Наоборот слишком малые расстояния между ребрами, зубцами или другими видами элементов повышенной шероховатости, вероятно не будут способствовать значительному повышению коэффициента шероховатости. Для иллюстрации недостаточности влияния слишком часто поставленных шашек приведем рис. 5, где приведены результаты опытов № 21 и 22 с моделью Троицкого барража в гидравлической лаборатории Института.¹ Здесь кривая 1 соответствует случаю, когда между „а“ и „б“ поставлены шашки размером $3 \times 3 \times 3$ через 3 см в шахмат по всей поверхности (ширина лотка $b = 40 \text{ см.}$) Кривая 2 соответствует случаю, когда участок дна ab представляет собой бетонированное русло. На участке bc плавающее прямолинейное расширение с $b = 40$ до $b = 53 \text{ см.}$

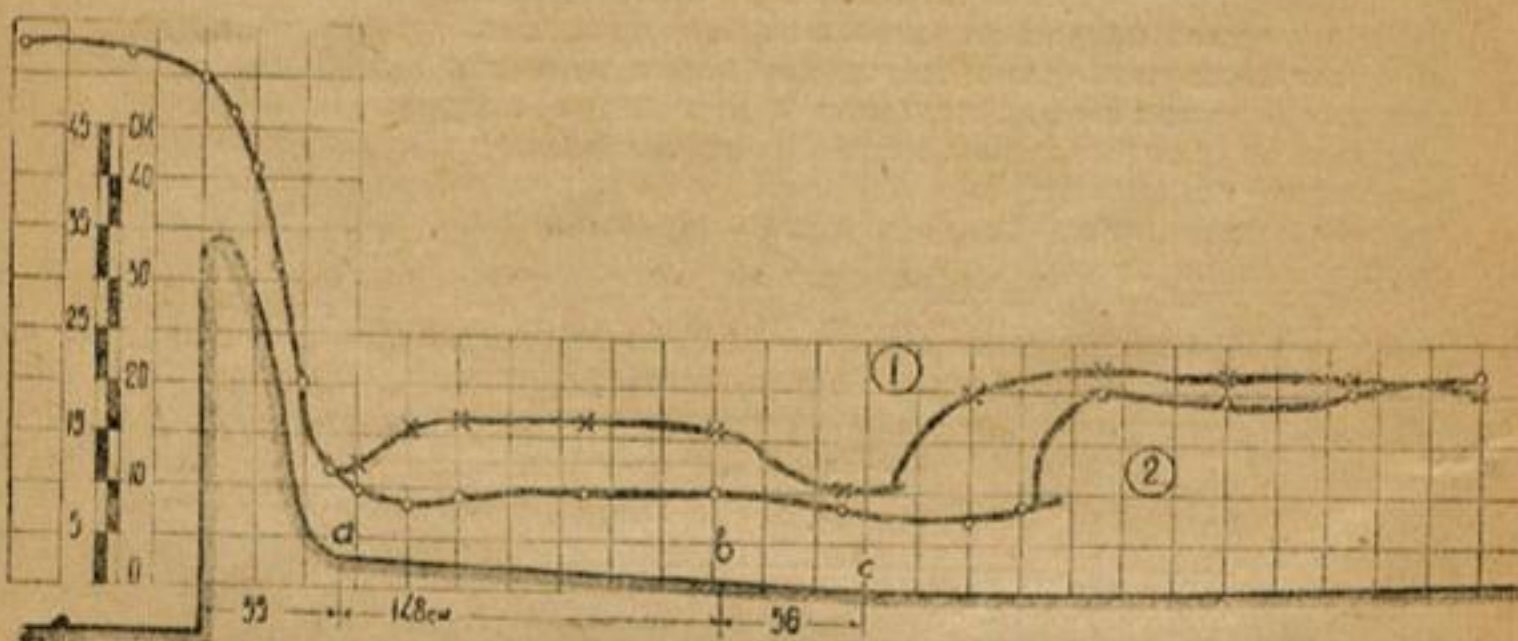


Рис. 5

Очевидно, что при широких и близко поставленных (даже высоких) планках или шашках поток при переходе с одной планки на другую не будет заметно терять своей энергии и в пределе шероховатость может быть вероятно получена близкой к шероховатости сравнительно гладких стенок.

¹ См. технический отчет в опытах с моделью Троицкого барража. 1926 г. Опыты под руководством В. Д. Журина и Д. Я. Соколова. См. статью студента В. Я. М. С. в бюллетене № 2 НТК ниж. меа. фак., 1929 г. Ташкент.

Изучение нескольких моделей во время опытов, произведенных в водном округе Миами¹ с успокоителем за сооружением с устройством на наклонном дне мелких шипов привело к следующим выводам:

1. При наличии шипов положение прыжка более устойчиво.
2. Донные скорости ниже прыжка уменьшаются, а поверхностные имеют тенденцию к повышению.
3. При одних и тех же условиях в нижнем бьефе шероховатое дно улучшает появление прыжка вблизи сжатого сечения струи.
4. Повышение горизонта в нижнем бьефе создает условие неустойчивого положения главного потока, который стремится идти по одной стороне канала. Опыты заставили опасаться, что при высоких горизонтах в нижнем бьефе поток пройдет над шипами без больших потерь энергии.

Помимо уже приведенных примеров, можно видеть влияние высоты зуба на увеличение коэффициента шероховатости из следующего сопоставления:

Таблица 12

№	Название	Ширина по дну в м	Уклон дна	Глубина воды	Размеры зуба			
					d	a	l	γ
1	Янги-даргом . .	12,00	0,015	0,74	5	40	140	1,2
2	Платоход Базика	12,00	0,027	0,80	30	—	150	4,6
3	При форме зубьев по Денилю (по В. Д. Журину)	12,00	0,027	0,80	27	—	80	2,37

Сопоставление это не дает возможности масштабирования, ибо как конструкция ребер,² так и уклон дна лотка, влияет на коэффициент шероховатости. Денилем получено, что при $i = \sin \alpha = 0,258$ $\gamma = 4,657$
а при $i = \sin \alpha = 0,550$ $\gamma = 5,035$

IX. Значения коэффициента шероховатости в формулах Базена, Г. Куттера и Маннинга по исследованиям моделей Акгазинского быстрого тока

Применяя эмпирические формулы Базена, Гагилье-Куттера и Маннинга к материалу, полученному в опытах с моделями Акгазинского быстрого тока, находим, что коэффициент шероховатости с увеличением глубины в лотке резко уменьшается, если за глубину считать полную глубину от дна лотка до поверхности воды. Такое рассмотрение приближает нас к зависимостям коэффициента шероховатости от глубины в руслах рек и каналов при наличии крупных выступов и камней (пример, сплавные реки Корелии, каналы с гравелистым ложем и др.), когда с увеличением средней глубины числовые значения коэффициента шероховатости падают. Надо заметить, что обратную зависимость

¹ См. В. Д. Жури. „Специальные приемы поташения энергии.“ 1927 г. См. также проф. К. А. Мизайлов „Проектирование сооружений на ирригационной сети“. 1932 г.

² Форма и расположение ребра Янги-даргома указаны на рис. 1 статьи Визго и Дмитровского, весьма сложная форма зуба Дениля приведена в курсе Замарина. Форма зуба платохода Базика имеет сложное очертание профиля, несколько заостренного. Кроме того, расположение ребра у Базика зигзагообразное. Для такого расположения проф. Е. А. Замарин считает коэффициент шероховатости увеличенным на 25% против расположения ребра нормально к сечению. См. „Гидротехнические сооружения“, том. I, стр. 84.

независимости и из логических соображений и получение такой обратной зависимости непременно является следствием ошибочных упрощенных представлений и расчетов.

Учет полной глубины, однако, не может считаться правильным. Введение же глубины над ребром, хотя и является более правильным, однако, также представляет собой лишь упрощение, необходимое для практических расчетов, при которых введение более уточненной, средней глубины представляет значительные затруднения. Введение глубины над планкой в подсчеты коэффициента шероховатости по материалам опытов, приводит к получению (в пределах сравнительно небольших изменений глубины во время опытов) значений коэффициента шероховатости почти постоянными. В следующих таблицах 13, 14, 15, 16 и 17 приведены подсчеты коэффициента шероховатости по различным формулам для лотка с гладким дном, с ребрами с острыми кромками и закругленными кромками.

Графики изменения коэффициентов шероховатости для планок с острыми краями, вычисленных по формуле Маннинга, приведены на рис. 6.

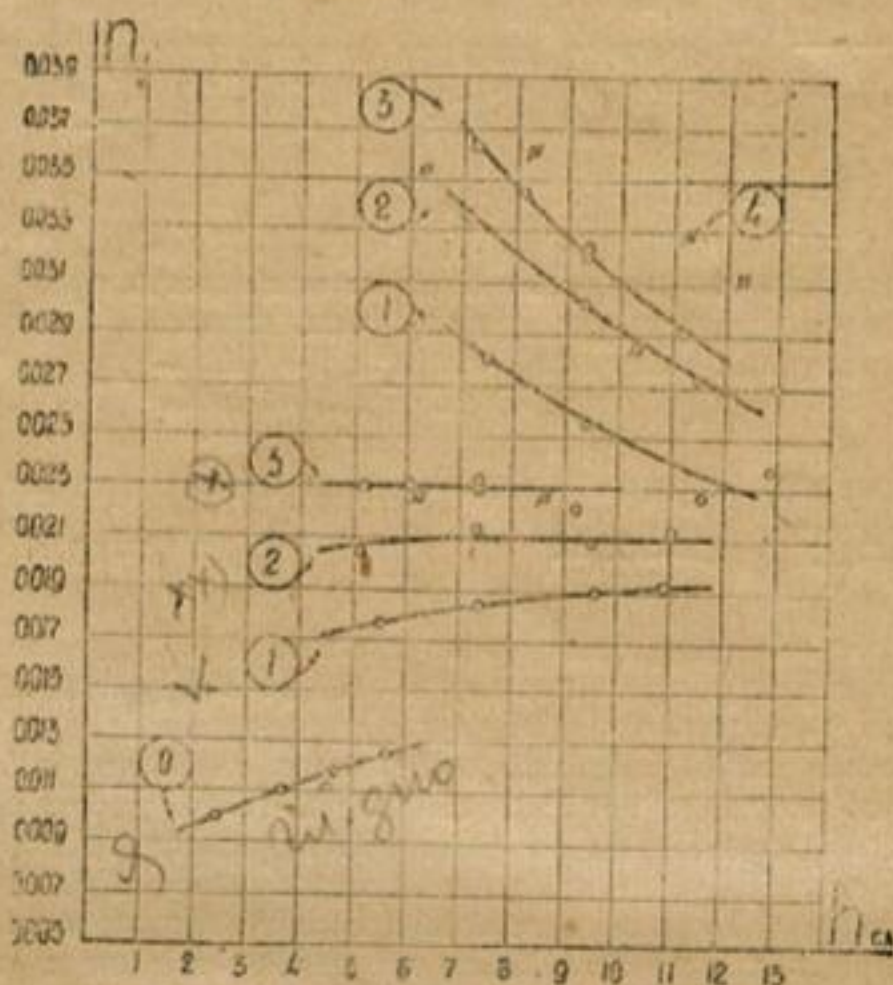


Рис. 6

Здесь верхняя группа кривых соответствует подсчетам коэффициента шероховатости по полной глубине, нижняя — подсчетам по глубине над ребром (планкой). Этот чертеж и таблицы показывают весьма наглядно, что как с увеличением уклона, так и с увеличением ширины лотка по дну, с набитыми на дне планками, коэффициент шероховатости при одинаковых глубинах возрастает.

$b=0,303$ м, $i=0,091$
(на графике рис. 6, крив. № 0)

Гладкое дно

Таблица 13

Опыт №	Расход Q л/сек	Глубина h см	Коэф. Шези C	Коэф. шероховатости	
				по Базену γ	по Маннингу n_1
21	18	2,52	52,94	0,09	0,0100
20	30	3,76	50,00	0,13	0,0112
22	40	4,60	50,63	0,14	0,0113
23	40	4,73	48,78	0,15	0,0118
19	50	5,74	46,73	0,18	0,0126

Ребра на дне (планки класс V) Острые кромки (рис. 6)

Таблица 14

Условия опыта	Опыт №	Расход Q л/сек	Глубина над планкой h см	Коэф. Шези C	Коэф. шероховатости		
					По Ба- зену γ	По Г. Куттеру n	По Ман- нингу n_1
Серия А $b=30,3$ $i=0,095$ Кривая № 4	50	20,2	6,3	16,75	0,88	0,0251	0,0355
	48	30,4	8,3	16,93	0,96	0,0262	0,0362
	57	31,4	6,2	26,05	0,40	0,0182	0,0228
	47	51,0	11,3	19,23	0,89	0,0250	0,0329
	49	51,2	10,3	22,04	0,73	0,0224	0,0285
	56	51,6	8,6	27,28	0,51	0,0185	0,0226
Серия А $b=24,0$ $i=0,0925$ Кривая № 3	46	61,0	12,3	20,47	0,85	0,0242	0,0312
	54	18,0	5,2	25,09	0,47	0,0178	0,0231
	53	22,8	6,1	25,53	0,48	0,0159	0,0230
	52	30,0	7,4	25,65	0,51	0,0186	0,0233
	55	30,4	7,4	26,11	0,50	0,0183	0,0230
	51	41,6	9,2	27,48	0,49	0,0182	0,0222
Серия В $b=30,5$ $i=0,0585$ Кривая № 2	61	20,9	5,1	28,48	0,40	0,0165	0,0204
	60	33,9	7,3	28,49	0,46	0,0175	0,0213
	59	50,3	9,5	29,81	0,46	0,0176	0,0209
	58	6,7	11,0	29,74	0,49	0,0180	0,0213
Серия В $b=24,2$ $i=0,0585$ Кривая № 1	65	20,2	5,5	32,70	0,32	0,0148	0,0177
	64	30,1	7,4	32,43	0,36	0,0154	0,0184
	63	41,7	9,6	32,32	0,39	0,0162	0,0190
	62	50,0	10,9	32,70	0,40	0,0163	0,0190

Закругленные планки (класс VI)

Таблица 15

Условия опыта	Опыт №	Расход Q л/сек.	Глубина над планкой h см	Коеф. Шези С	Коеф. шероховатости		
					γ	n	n_1
Серия В $i=0,0596$ $b=30,0$ Кривая №2	184	20,2	4,7	30,82	0,346	0,0154	0,0191
	183	30,3	6,5	30,00	0,403	0,0165	0,0199
	186	40,0	7,8	30,41	0,426	0,0181	0,0201
	182	41,0	7,9	30,77	0,419	0,0165	0,0198
	181	60,3	10,5	31,41	0,441	0,0172	0,0200
	185	70,4	11,9	31,42	0,455	0,0174	0,0202
Серия В $i=0,0596$ $b=24,1$ Кривая №1	189	17,9	5,0	32,24	0,32	0,0148	0,0177
	188	25,0	7,0	32,74	0,53	0,0170	0,0207
	137	49,9	11,3	31,29	0,43	0,0170	0,0199
	204	18,0	4,33	32,52	0,30	0,0143	0,0173
Серия А $i=0,0894$ $b=24,1$ Кривая № 3	198	20,0	4,92	30,58	0,34	0,0153	0,0186
	199	29,8	6,54	30,84	0,37	0,0159	0,0191
	200	40,5	8,23	30,72	0,41	0,0166	0,0197
	202	40,0	7,96	31,70	0,38	0,0161	0,0190
	205	49,8	9,45	31,55	0,41	0,0165	0,0194
	201	60,7	11,03	31,62	0,42	0,0168	0,0197
	203	60,2	11,09	31,62	0,42	0,0168	0,0197
Серия С $i=0,118$ $b=24,1$ Кривая № 5	194	19,6	4,4	29,56	0,35	0,0154	0,0191
	192	25,0	5,5	28,02	0,41	0,0167	0,0206
	195	25,0	5,7	30,58	0,35	0,0154	0,0188
	196	30,3	6,0	30,25	0,38	0,0160	0,0194
	191	40,0	7,6	29,48	0,42	0,0168	0,0203
	193	49,3	9,1	28,57	0,47	0,0170	0,0213
	197	60,1	10,2	30,07	0,44	0,0170	0,0205
	190	60,5	10,4	29,68	0,46	0,0175	0,0208

Острые кромки (рис. 6) Глубина до дна лотка

Таблица 16

Условия опыта	Опыт №	Глубина (h+2) см	С	Коеф. шероховатости по Маннингу n_1
Серия А $i=0,0925$ $b=24,0$ Кривая № 3	54	7,2	16,4	0,0363
	53	8,1	17,5	0,0345
	52	9,4	19,0	0,0323
	55	9,4	19,1	0,0321
	51	11,2	21,4	0,0291
Серия В $i=0,0585$ $b=30,5$ Кривая № 2	61	7,1	18,0	0,0336
	60	9,3	20,5	0,0303
	59	11,5	23,2	0,0274
	58	13,0	23,8	0,0270
Серия В $i=0,0585$ $b=24,2$ Кривая № 1	65	7,5	21,3	0,0281
	64	9,4	23,9	0,0256
	63	11,6	27,3	0,0226
	62	12,9	26,6	0,0237

Примечание: Опыты № 50—46 в эту таблицу не введены как имеющие погрешности в измерениях и записях.

Закругленные крошки. Глубина до дна лотка.

Таблица 17

Условия опыта	Опыт №	Глубина (h+2) см	Коэф. Шензи С	Коэф. шероховатости по Маннингу n_1
Серия В $i=0,0596$ $b=30,0$ Кривая № 2	184	6,7	18,88	0,0319
	183	8,5	20,90	0,0294
	186	9,8	22,99	0,0271
	182	9,9	23,14	0,0270
	181	12,5	25,23	0,0253
	185	13,9	25,69	0,0251
Серия В $i=0,0596$ $b=24,1$ Кривая № 4	189	7,0	20,57	0,0289
	188	9,0	20,83	0,0293
	187	13,3	25,33	0,0250
	204	6,33	19,35	0,0304
Серия А $i=0,0894$ $b=24,1$ Кривая № 3	198	6,92	19,05	0,0312
	199	8,54	20,75	0,0292
	200	10,28	23,14	0,0267
	202	9,96	22,60	0,0272
	205	11,45	24,90	0,0250
	201	13,03	25,61	0,0246
	203	13,09	25,40	0,0248
Серия С $i=0,1180$ $b=24,1$ Кривая № 5	194	6,4	18,15	0,0324
	192	7,5	18,66	0,0321
	195	7,2	19,53	0,0306
	196	8,0	20,90	0,0288
	191	9,6	21,71	0,0282
	193	11,1	22,21	0,0280
	197	12,2	21,14	0,0260
	190	12,4	23,82	0,0263

Х. Учет неоднородности шероховатости по периметру

В большинстве случаев, так же как и в опытах с моделью Акгазинского быстрого тока, профиль имеет различную степень геометрической шероховатости по периметру.

Практическая гидротехника требует в данном случае решения задачи о нахождении „среднего коэффициента шероховатости“ профиля, оценивая коэффициент шероховатости отдельных участков периметра средними табличными значениями коэффициента шероховатости соответственно условиям геометрической шероховатости (материал участка периметра, форма и размер планок).

Естественно, что решение этой задачи является весьма трудным, тем более, что приведенный способ решения является сугубо схематическим—влияние степени шероховатости, различной по профилю, весьма сложно отражается на гидравлических сопротивлениях.

Известны некоторые приемы решения этой задачи. Так, например, в „Гидравлике“ проф. Ф. Форхгеймера приведен прием Зидека и его опытные формулы и коэффициенты. Зидек весь профиль делит на части, при чем выделяет зону в 0,5 м полосой по смоченному периметру и для каждого участка с постоянной шероховатостью подсчитывает потери. Для остальной части профиля (за вычетом этой полосы), непосредственно стенки не смачивающей, Зидек ведет отдельный подсчет.¹ От-

¹ Ph. Forchheimer. Hydraulik, 1924 г., стр. 73.

мечая известный логический смысл такого рассмотрения, нельзя не отметить произвола выбора размеров этой полосы (0,5 м) и громоздкость формул Зидека; эти обстоятельства не могут способствовать распространению его приема.

Часто принято при подсчете среднего коэффициента шероховатости всю площадь живого сечения разбивать на части либо по биссектрисам углов, либо по вертикалям из точек периметра, где меняется шероховатость; иногда применяются и другие приемы.

В работе „К расчету канала с профилем различной шероховатости“ Г. И. Шамов и Д.Я. Соколов¹ приводят следующую сокращенную формулу (учитывающую шероховатость γ по формуле Базена)

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{\gamma_1 \chi_1 + \gamma_2 \chi_2}{\chi_1 + \chi_2}$$

Здесь $\gamma_{\text{ср}}$ — средний коэффициент шероховатости для всего сечения;

γ_1 — коэффициент шероховатости на части периметра χ_1 ;

γ_2 — то же на части χ_2 .

Приведенная там же полная формула имеет вид:

$$(\chi_1 + \chi_2) \left(1 + \frac{\gamma_{\text{ср}}}{VR}\right)^2 = \chi_1 \left(1 + \frac{\gamma_1}{VR}\right)^2 + \chi_2 \left(1 + \frac{\gamma_2}{VR}\right)^2 \quad (C)$$

Предел применения сокращенной формулы определяется величиной $\frac{\gamma}{VR}$; именно, применение возможно, если пренебрежение квадратом этой величины по отношению к ее первой степени приводит к допустимой ошибке в определении расхода.

Очевидно, что чем больше гидравлический радиус R и чем меньше коэффициент шероховатости γ , тем меньше будет расхождение между полной и сокращенной формулами.

Оценивая шероховатость гладкого бетонного русла коэффициентами $\gamma_1=0,06$ и $\gamma_1=0,20$ и беря значение среднего значения коэффициента шероховатости по таблице 3, получаем значения γ_2 в таблице 18.

Таблица 18

Расход		65,10	33,50	28,90
$\gamma_{\text{ср}}$		0,92	1,79	1,78
$\gamma_1=0,06$	полная	1,02	1,95	203
	сокращ.	1,06	2,13	261
$\gamma_1=0,20$	полная	1,00	1,95	2,03
	сокращ.	1,04	2,11	1,99

Применяя сокращенную формулу для лотка модели Акгазинского быстротока, считая $\gamma_1=0,16$ при значениях $\gamma_{\text{ср}}$ соответств. глубине $h=4d=8$ см, получаем табл. 19.

¹ См. «Вестник Ирригации» № 7 за 1927 г.

Таблица 19

Условия и № опытов	$\gamma_{\text{ср}}$	γ_1	$b = \gamma_2$	γ_2
Острые ребра				
51—51 $i=9\%$	0,50	0,40	0,24	0,733
61—58 $i=9\%$	0,46	0,46	0,30	0,627
65—62 $i=6\%$	0,37	0,40	0,24	0,517
Закругленные ребра				
181—185 $i=6\%$	0,42	0,46	0,30	0,568
189—187 $i=6\%$	0,35	0, 0	0,24	0,483
204—203 $i=9\%$	0,39	0,40	0,24	0,560
1 4—110 $i=12\%$	0,42	0,40	0,24	0,600

Как и можно было ожидать, значения γ_2 не получены нами постоянными и в таблице 19, так же как и в таблице 18.

На основании тех же принципов, с помощью которых выведены предыдущие формулы (С), проф. Павловский Н. Н. для степенной эмпирической зависимости (Маннинг, Форхгеймер, Павловский) приходит к формуле¹

$$v_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{n_1^2 + a n_2^2}{1 + a}}$$

которую можно переписать так:

$$n_2 = \sqrt{\frac{v_{\text{ср}}^2 (1 + a) - n_1^2}{a}}$$

Здесь

$$a = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}; \quad \begin{array}{l} n_1 \text{ — к. ш. на части } \gamma_1; \\ n_2 \text{ — к. ш. на части } \gamma_2. \end{array}$$

Оценивая коэффициент шероховатости гладких бетонных стенок коэффициентами $n = 0,010$ и $n_1 = 0,020$ для Янгидаргомского быстротока, найдем

¹ См. «Известия НИТИ», т. III, декабрь 1931 г., статья «К вопросу о расчетной формуле для равномерного движения в водотоках с неоднородными стенками».

Таблица 20

Расход	69,0		37,5		27,5	
пер	0,0312		0,0388		0,0458	
n_1	0,010	0,020	0,010	0,020	0,010	0,020
n_2	0,034	0,033	0,041	0,040	0,049	0,048

Как видим, значения n_2 не получены постоянными, при чем с увеличением пер возрастает и n_2 . Числовое значение n_1 оказывает очень малое влияние. Отмечая это обстоятельство, приходится указать, что повидимому положенные в основу расчетной формулы положения не соответствуют истине. Для опытов с Акгазинским быстротоком имеем данные, сведенные в таблицу 21.

Таблица 21

Острые ребра			$n_1 = 0,011$			
№№ опытов	Уклон %	χ	$\chi_2 = b$	пер	n_2	
61—58	6	0,46	0,30	0,021	0,024	(0,0236)
65—62	6	0,40	0,24	0,019	0,023	(0,0228)
54—51	9	0,40	0,24	0,023	0,029	(0,0283)
Закругленные ребра			$n_1 = 0,011$			
184—185	6	0,46	0,30	0,020	0,023	(0,0234)
182—187	6	0,40	0,24	0,019 0,0187	0,0225	(0,0228)
204—203	9	0,40	0,24	0,0195	0,024	(0,0235)
194—190	12	0,40	0,24	0,021	0,026	(0,0256)

Для уклона $i=6\%$ вычисленные для лотков различной ширины значения n_2 имеют более или менее одинаковые величины. Это позволяет применить приведенные в этом параграфе формулы для масштабирования коэффициентов.

Для этого:

1. При $\frac{h}{d} = \text{const} = 4$ и $\frac{1}{d} = \text{const} = 6$ для постоянного уклона i и некоторой ширины b считаем коэффициент шероховатости равным n .

2. Подсчитываем для той же глубины h ($\frac{h}{d} = \text{const}$) и того же уклона коэффициент шероховатости для другой ширины b , пользуясь формулой Павловского.

Изменяя произвольно величину d , но сохраняя соотношения $\frac{h}{d} = 4$ и $\frac{1}{d} = 6$, подсчитываем коэффициент шероховатости, пользуясь коэффициентом масштабирования шероховатости и степенной формулой Маннинга

$$n = \frac{R^{2/3} \cdot \sqrt{i}}{C} = \frac{i}{C} R^{1/3}$$

Так как при изменении линейных размеров модели, гидравлический радиус изменяется в том же соотношении при изменении линейного масштаба в m раз, коэффициент шероховатости изменяется в M раз, где $M=m^{1/6}$.

В этом случае вполне строго соблюдаются законы геометрического подобия. Подobie механическое будем считать здесь также достаточно соблюденным, ибо здесь значение коэффициента Шези остается постоянным¹.

Пользуясь этими приемами и таблицами 21, пересчетом получаем следующие значения коэффициентов шероховатости при различных уклонах (см. таблицы 22, 23, 24 и 25)

Коэффициент шероховатости гладких стенок $n_1=0,011$.
Коэффициент шероховатости ребристого дна $n_2=0,0225$
 $i=6\%$; лоток прямоугольного сечения

Таблица 22

$b = \gamma_2$	a	вер при $d=2$ $h=8$	вер			По Замари- ну при $d=15$ см
			$d=5$	$d=10$	$d=15$	
0,24	1,50	0,0188	0,0218	0,0246	0,0263	—
0,30	1,88	0,0193	0,0224	0,0253	0,0270	—
0,50	3,12	0,0203	0,0235	0,0266	0,0284	—
1,00	6,25	0,0213	0,0247	0,0279	0,0298	—
2,00	12,50	0,0218	0,0253	0,0286	0,0305	0,0270
5,00	31,25	0,0222	0,0258	0,0291	0,0311	0,0320
10,00	62,50	0,0223	0,0259	0,0292	0,0312	—
12,00	75,0	0,0224	0,0260	0,0293	0,0314	0,0370
20,00	125,0	0,0224	0,0260	0,0293	0,0314	—

$n_1=0,011$
 $n_2=0,023$
 $i=6\%$

Таблица 23

b	a	вер при высоте планки:				По Замари- ну при $d=15$ см
		$d=2$	$d=5$	$d=10$	$d=15$	
0,24	0,50	0,0191	0,0222	0,0250	0,0268	—
0,30	1,88	0,0197	0,0229	0,0258	0,0278	—
0,50	3,12	0,0207	0,0240	0,0271	0,0292	—
1,00	6,25	0,0217	0,0252	0,0284	0,0306	—
2,00	12,50	0,0223	0,0259	0,0292	0,0314	0,027
5,00	31,25	0,0227	0,0263	0,0297	0,0320	0,032
10,00	62,50	0,0228	0,0264	0,0299	0,0321	—
12,00	75,00	0,0229	0,0266	0,0300	0,0323	0,037
20,0	125,00	0,0230	0,0267	0,0304	0,0327	—

¹ Не имея возможности утверждать, что при большой степени турбулентности потока сравнением коэффициентов Шези, мы получаем уравнения и условия, удовлетворяющие механическому подобию, тем более, что в данном случае числовые значения гидравлического радиуса достаточно малы, все же сохраняем этот прием масштабирования. Ср. В. Н. Чарномский „Лотки прямоугольного сечения усиленной шероховатости“, проф. Е. А. Замарин „Гидротехнические сооружения“, т. I, стр. 88 и 89. См. также проф. Я. А. Палкуева „Механическое подобие и т. д.“ Труды ВН. ИИГИМ, том VII, стр. 139.

$$\begin{aligned} n_1 &= 0,011 \\ n_2 &= 0,024 \\ i &= 9\% \end{aligned}$$

Таблица 24

b	a	пер при значениях высоты планки				По Замари- ну при d=15 см
		d=2	d=5	d=10	d=15	
0,24	1,50	0,0198	0,0230	0,0259	0,0277	—
0,30	1,88	0,0204	0,0237	0,0267	0,0286	—
0,50	3,12	0,0216	0,0251	0,0283	0,0302	—
1,00	6,25	0,0226	0,0262	0,0296	0,0316	—
2,00	12,50	0,0233	0,0270	0,0305	0,0326	0,028
5,00	31,25	0,0237	0,0275	0,0310	0,0332	0,033
10,00	62,50	0,0238	0,0276	0,0312	0,0333	—
12,00	75,50	0,0239	0,0277	0,0313	0,0335	0,039
20,0	125,00	0,0240	0,0278	0,0314	0,0336	—

Коэффициент шероховатости гладких стенок $n=0,011$
 Коэффициент шероховатости ребристого дна $n_2=0,026$
 $i=12\%$. Лоток прямоугольного сечения

Таблица 25

b	a	пер при высоте планки				По Замари- ну при d=15 см
		d=2	d=5	d=10	d=15	
0,24	1,50	0,0213	0,0247	0,0279	0,0298	—
0,30	1,88	0,0220	0,0255	0,0301	0,0308	—
0,50	3,12	0,0233	0,0270	0,0305	0,0326	—
1,00	6,25	0,0245	0,0284	0,0321	0,0343	—
2,00	12,50	0,0252	0,0292	0,0330	0,0353	0,0285
5,00	31,25	0,0257	0,0298	0,0337	0,0360	0,0340
10,00	62,50	0,0258	0,0299	0,0338	0,0361	—
12,00	75,0	0,0259	0,0300	0,0339	0,0363	0,0400
20,00	125,0	0,0259	0,0300	0,0339	0,0363	—

В таблицах приведены также значения коэффициентов проф. Е. А. Замарина, определенных им с учетом влияния ширины лотка другим способом. Как видим, обнаруживается некоторое расхождение числовых значений. Поэтому, а также принимая указания проф. Е. А. Замарина, при пользовании цифровыми значениями следует вводить их с учетом колебаний в пределах $\pm 10\%$.

Совершенно очевидно, что указание Е. А. Замарина о необходимости учета захвата воздуха здесь также остается полезным¹.

В заключение считаем нужным отметить необходимость дальнейших наблюдений за режимом потока в условиях русла с искусственной шероховатостью, продолжения исследований на Янги-даргоме (дополнительных, при других расходах и поверочных), и на быстротоке, выстроенном в 1933 г. Вахшстроем с зубцами против течения (соответ-

¹ См. «Гидротехнические сооружения», стр. 91, где Е. А. Замарин рекомендует в качестве первого приближения учитывать захват воздуха в количестве до 10% от объема воды или до 10% от живого сечения, что одно и то же при прямоугольном сечении лотка.

ствуется классу I и II по таблице 5), а также проведения исследований и на других сооружениях.

Эти исследования, кроме конкретной проверки принятых в расчетах и приводимых в таблицах значений коэффициентов шероховатости, позволят также правильнее подойти к решению задачи о выявлении физической стороны и математических зависимостей для учета гидравлических потерь (сопротивлений), ибо только тот закон будет действительно верен, который даст одинаково правильные ответы как для гладких стенок (эмаль, стекло, свинец и др.), так и для весьма шероховатых, вплоть до стенок с искусственно усиленной шероховатостью.

Содержание

	Стр.
Предисловие	3
В. Н. Ярцев и Г. Н. Туркин— <i>Акведук на Джуне, бетонированные участки каналов Янги-даргом и Янги-арых</i>	5
I. Введение	—
II. Методы исследования и обработки материалов	10
III. Результаты исследований	12
а) Канал Янги-арых	—
б) Канал Янги-даргом	13
в) Джунский деревянный акведук	—
IV. Выводы	14
М. С. Вызго— <i>Шероховатость дренажных глиняных труб</i>	17
М. С. Вызго и В. Н. Дмитриевский— <i>Быстроток на канале Янги-даргом</i>	29
I. Введение. Методы, принятые при исследованиях. Описание сооружений	—
II. Материалы наблюдений	30
III. Результаты наблюдений	31
М. С. Вызго, К. К. Дмитриев, Я. А. Никитин— <i>Быстроток сброса канала Дальверзин</i>	34
I. Описание наблюдений на криволинейном быстротоке сброса Дальверзинского магистрального канала	—
II. Выпуск Янги на Даргоме	39
III. Результаты наблюдений и числовые значения коэффициента шероховатости	40
М. С. Вызго— <i>Тотки с различной степенью шероховатости в поперечном сечении</i>	44
I. Введение	—
II. Общие определения	46
III. Опытные данные и расчетные формулы Базена, Вилкея и др.	47
IV. Исследования на Янги-даргоме и лабораторные опыты с Ангазинским быстротоком	51
V. Число Рейнольдса и абсолютная шероховатость Мизеса	56
VI. Формула Штриккера	57
VII. Опыты Дениля и приведенная шероховатость	58
VIII. Влияние глубины	60
IX. Значения коэффициента шероховатости в формулах Базена, Г. Куттера и Маннинга по исследованиям моделей Ангазинского быстротока	63
X. Учет неоднородности шероховатости по периметру	67

(13074)

1 079