ВОПРОСЫ ГИДРОТЕХНИКИ

ВЫПУСК

3

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ И ГИДРОТЕХНИКИ

ВОПРОСЫ ГИДРОТЕХНИКИ

ВЫПУСК 3

(РАБОТЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ)

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР
ТАШКЕНТ·1961

В сборнике приведены результаты экспериментальных исследований и практических работ молодых ученых Института водных проблем и гидротехники АН УзССР. Широко освещены вопросы автоматизации и телемеханизации водораспределения, контроля и учета воды на оросительных системах. Даны гидравлическая и техническая характеристики некоторых систем и крупных каналов. Предложены расчетные схемы и формулы конструкций автоматических затворов для гидротехнических сооружений. Описаны методы устройства и закладка пьезометров и обобщен опыт эксплуатации последних в производственных условиях. Рассмотрены опыт применения закрытого горизонтального дренажа на целинных землях Голодной степи и другие вопросы гидротехники и мелиорации.

Книга предназначена для работников проектных, строительных и эксплуатационных организаций водного хозяйства и может служить практическим руководством по отдельным вопросам гидротехники.

Ответственный редактор
З. Х. Хусан-Ходжаев

З. И. РЯДОВА

К РАСЧЕТУ ВОДОСЛИВА С ШИРОКИМ ПОРОГОМ

Настоящая работа является частью исследования, проводимого гидравлической лабораторией Института водных проблем и гидротехники АН УзССР с целью разработки метода расчета сооружений по типу водослива с широким порогом.

Рассмотрим случай незатопленного водослива с боковым сжатием. Решая плоскую задачу истечения через водослив, мы [1,2] устанавливали связь коэффициента расхода m с относительной высотой порога $\frac{p}{H}$ и очертанием входного ребра, т.е. для прямоугольного входа получали $m = f\left(\frac{p}{H}\right)$.

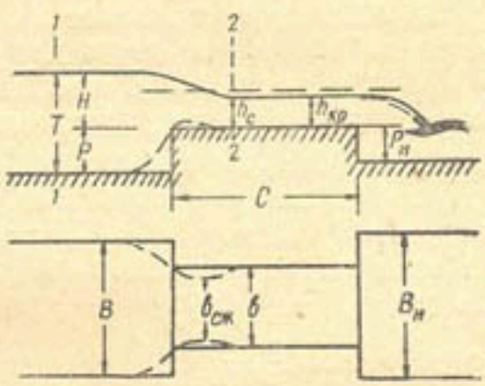


Рис. 1.

Истечение через водослив с боковым сжатием (рис. 1) при прямоугольной форме входа и определенном типе устоев, очевидно, характеризуется коэффициентом расхода, величина которого является функцией как относительной высоты порога $\frac{p}{H}$, так и относительной ширины его $\beta = \frac{b}{B}$, т. е. $m = f\left(\frac{p}{H}, \beta\right)$.

Используя наши выводы, полученные ранее для условий плоской задачи в отношении пространственных границ области протекания рассматриваемого явления, мы в данном случае также считаем что величины T — глубина потока перед водосливом — и h_c — глубина потока на пороге водослива—являются параметрами, характеризующими эти границы. T и h_c определяют явление истечения через водослив с широким порогом и при наличии бокового сжатия: T — как исходная данная, h_c — как совокупный результат данного процесса при всех конкретно действующих факторах и обстоятельствах, известных или неизвестных нам. Знание величины h_c (при заданных p, H, β) является ключом к решению задачи о его пропускной способности, т. е. к определению m.

Оба фактора — относительная высота порога и относительная ширина его, обусловливающие соответственно вертикальное и боковое сжатие потока, влияют на величину h_c в одном направлении. Но степень участия в формировании h_c одной и той же величины бокового сжатия, зависящая от отношения $\frac{p}{H}$, различна. Отдельный, самостоятельный учет этих двух факторов сложен.

Нами предложен способ расчета водослива с боковым сжатием, в котором оба фактора, влияющие на величину коэффициента расхода, приводятся к одному — приведенной относительной высоте порога $\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$. Влияние бокового сжатия учитывается путем некоторого увеличения действительной физической высоты порога.

При оценке механизма потерь энергии в данном случае мы руководствуемся теми же положениями, которые были приняты при рассмотрении плоской задачи, т. е. считаем, что степень преобразования энергии из потенциальной в кинетическую определяет собой размер сопротивлений, преодолеваемых потоком при вступлении на водослив (теперь уже этот процесс преобразования обусловлен как вертикальным, так и горизонтальным сжатием потока); поэтому для характеристики потерь энергии принимаем отношение параметров кинетичности в сечении перед водосливом и на пороге в „сжатом" сечении[1].

Определение приведенной относительной высоты порога достигается на основании двух допущений.

Первое допущение, необходимость которого возникла вследствие невозможности непосредственного измерения h_c с достаточной точностью (наличие косых волн на водосливе), заключается в следующем: параметр кинетичности потока в сечении со „сжатой" глубиной имеет то же значение, что и на плоском водосливе. Руководствуясь обобщенной количественной оценкой происходящих процессов, можно обосновать названное допущение таким рассуждением. При равных условиях в отношении $\frac{p}{H}$, H, b пропускная способность водослива с боковым сжатием несколько меньше, чем водослива плоского, но при этом и „действующая" ширина водослива со сжатием $b_{сж} < b$, а также вероятно, и $h_{c_{сж}} < h_{c_{пл}}$.

Считая, что уменьшение в величине расхода компенсируется уменьшением „действующей" пропускной площади $b_{сж} \times h_{c_{сж}}$, принимаем

$$П_{2_{сж}} = П_{2_{пл}},$$

или

$$\frac{Q^2_{сж}}{gh^3_{c_{сж}} \cdot b^2_{сж}} = \frac{Q^2_{пл}}{gh^3_{c_{пл}}\, b^2}.$$

Это допущение проверено путем соответствующей обработки опытных данных (М. Д. Чертоусова, А. Р. Березинского, З. И. Рядовой).

---

[1] Здесь и далее „сжатой" названа глубина потока, которая создается вследствие обтекания порога и устоев при заданных исходных параметрах; соответствующее ей „сжатое" сечение — граничное сечение, ниже которого движение происходит за счет имеющегося в нем запаса энергии.

Второе допущение заключается в том, что, объединяя влияние на процесс протекания частных факторов $\frac{p}{H}$ и β в одном параметре $\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$ и переходя в связи с этим к „приведенным" величинам, мы считаем справедливыми для водослива с боковым сжатием все зависимости, полученные путем приложения закона количества движения при решении плоской задачи с единственным изменением; коэффициент α здесь принимается равным 1,15 вместо 1,06, т. е.

$$m = 0{,}465 \sqrt{\frac{(s^2 - k^2)\,k}{1-k}}, \tag{1}$$

$$q = m\sqrt{2g}\,T^{3/2}, \tag{2}$$

где

$$T = p + H, \quad s = \frac{H}{T}, \quad k = \frac{h_c}{T}. \tag{3}$$

Величины k и $\frac{p}{H}$ связаны такой зависимостью:

$$k = \sqrt[3]{\frac{\Pi_1}{\Pi_2}} = \sqrt[3]{\frac{0{,}0205}{\left(\frac{p}{H}\right)^{2/3}} - 0{,}0022}, \tag{4}$$

а также

$$\Pi_2 = \frac{q^2}{gh_c^3} = \frac{m^2\,2g\,T^3}{gk^3\,T^3} = 2\,\frac{m^2}{k^3}. \tag{5}$$

Имея возможность определять Π_1 — из условий задачи, Π_2 — как для плоского водослива по заданному $\frac{p}{H}$ (согласно принятому допущению), находим $\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$ из соотношения (4)

$$\left(\frac{p}{H}\right)_{пр} = \left(\frac{0{,}0205}{\frac{\Pi_1}{\Pi_2} + 0{,}0022}\right)^{3/2}.$$

Дальнейший расчет требует определения „приведенных" величин, соответствующих $\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$. При заданной величине напора H на водосливе имеем:

$$p_{пр} = \left(\frac{p}{H}\right)_{пр} \cdot H,$$

$$T_{пр} = p_{пр} + H,$$

$$s_{пр} = \frac{H}{T_{пр}};$$

$k_{пр}$, $m_{пр}$ и q находятся по зависимостям (1), (2), (4) путем подстановки соответствующих „приведенных" величин. Порядок расчета поясняется в примерах.

Пример. Определить расход водослива с широким порогом при прямоугольном входном ребре и прямоугольной форме устоев.

I. Дано[1]:

$$H = 0{,}0766\ м,\ b = 0{,}43\ м,\ B = 0{,}505\ м,\ p = p_H = 0{,}055\ м.$$

Находим по заданным условиям характеристики водослива с боковым сжатием $\frac{p}{H}$ и β и параметры плоского водослива:

β	$\frac{p}{H}$	T	s	k	m	Π_2
0,85	0,72	0,132	0,58	0,315	0,160	1,64

Задаем произвольно (но в определенных пределах) ряд значений Q и переходим в расчете к погонному расходу $q = \frac{Q}{b}$. Расчет приведен в табл. 1.

Таблица 1

Q, $м^3/сек$	q, $м^3/сек$	Π_1	Π_2	$\frac{\Pi_1}{\Pi_2}$	$\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$	$p_{пр}$	$T_{пр}$	$k_{пр}$	$s_{пр}$	$m_{пр}$	q, $м^3/сек$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,010	0,0232	0,01755	1,64	0,0107	1,36	0,1041	0,181	0,221	0,424	0,0894	0,0305
0,013	0,0302	0,0296	1,64	0,0181	1,01	0,0774	0,154	0,261	0,497	0,017	0,0314
0,016	0,0372	0,0449	1,64	0,0274	0,78	0,0605	0,137	0,300	0,561	0,145	0,0326
0,020	0,0465	0,0701	1,64	0,0428	0,59	0,0458	0,122	0,351	0,629	0,179	0,0340

По данным табл. 1 (графы 2, 6, 12) строятся две кривые

$$q = f\left(\frac{p}{H}\right)_{пр},$$

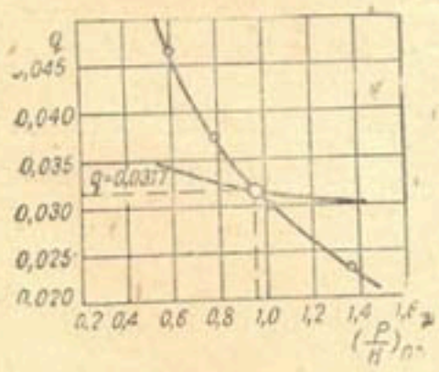


Рис. 2.

представленные на рис. 2. Точка пересечения этих кривых определяет искомую величину расхода и приведенную относительную высоту порога, соответствующую заданным условиям $\left(\frac{p}{H}\right.$ и $\left.\beta\right)$. Вычисленная таким способом величина расхода $q = 0{,}0317\ м^3/сек$ отличается от опытной $q = 0{,}0324\ м^3/сек$ на 2,0%.

II. Дано[2]:

$$H = 0{,}3157\ м,\ b = 1{,}61\ м,\ B = 1{,}92\ м,\ p = p_H = 0{,}101\ м.$$

---

[1] Данные заимствованы из опытов М. Д. Чертоусова (Цикл III, серия 13", опыт № 2) для возможности сопоставления расчетной величины расхода с опытной.

[2] Данные взяты из опытов М. Д. Чертоусова (Цикл II, серия 10', опыт № 2).

Находим по заданным условиям характеристики водослива с боковым сжатием $\frac{p}{H}$, β и параметры плоского водослива:

β	$\frac{p}{H}$	T	s	k	m	Π_2
0,84	0,32	0,4167	0,758	0,481	0,272	1,34

Задаем произвольно ряд значений Q и производим расчет (табл. 2). Результаты расчета представлены на рис. 3.

Таблица 2

Q, $м^3/сек$	q, $м^3/сек$	Π_1	Π_2	$\frac{\Pi_1}{\Pi_2}$	$\left(\frac{p}{H}\right)_{пр}$	$p_{пр}$	$T_{пр}$	$m_{пр}$	q, $м^3/сек$
1	2	3	4	5	6	7	8	11	12
0,510	0,317	0,0991	1,34	0,074	0,415	0,131	0,447	0,226	0,300
0,490	0,304	0,0915	1,34	0,0682	0,440	0,139	0,455	0,218	0,297
0,470	0,292	0,0844	1,34	0,063	0,462	0,146	0,462	0,211	0,294
0,450	0,280	0,0775	1,34	0,0579	0,488	0,154	0,470	0,204	0,290

Искомая величина расхода $q = 0{,}295$ $м^3/сек$, опытное значение ее $q = 0{,}30$ $м^3/сек$, отклонение —1,8%.

Отметим, что параметры s, k, m, а также Π_2 являются функцией только относительной высоты порога $\frac{p}{H}$; поэтому в расчетах удобно пользоваться графической зависимостью этих величин (рис. 4); при этом нет необходимости заполнять графы 9 и 10 таблиц.

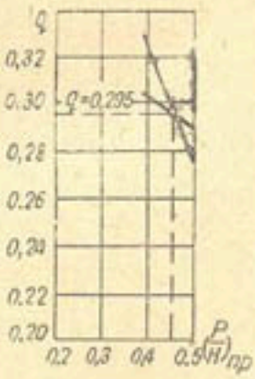


Рис. 3.

На графике рис. 4 кривая $m = f\left(\frac{p}{H}\right)$ соответствует случаю плоского водослива, т. е. построена по уравнению (1) с постоянным коэффициентом 0,485 и используется при вычислении m и $\Pi_2 = 2\frac{m^2}{k^3}$. Для определения $m_{пр}$ значение его, взятое с графика, должно быть умножено на $\frac{0{,}465}{0{,}485} = 0{,}96$.

Изложенный принцип можно применить и к водосливу с закругленной входной кромкой, используя зависимости, полученные для этой формы входа и приведенные в упомянутых ранее работах [1, 2]. Порядок расчета аналогичен предыдущему и не нуждается в особом пояснении.

В настоящем изложении способа расчета пропускной способности водослива отсутствует учет такого фактора, как отношение $\frac{b}{H}$, влияние которого на коэффициент расхода при наличии бокового сжатия, по-видимому, не вызывает сомнения. Будем называть его относительной шириной пролета, в отличие от $\beta = \frac{b}{B}$ — „конструктивной" отно-

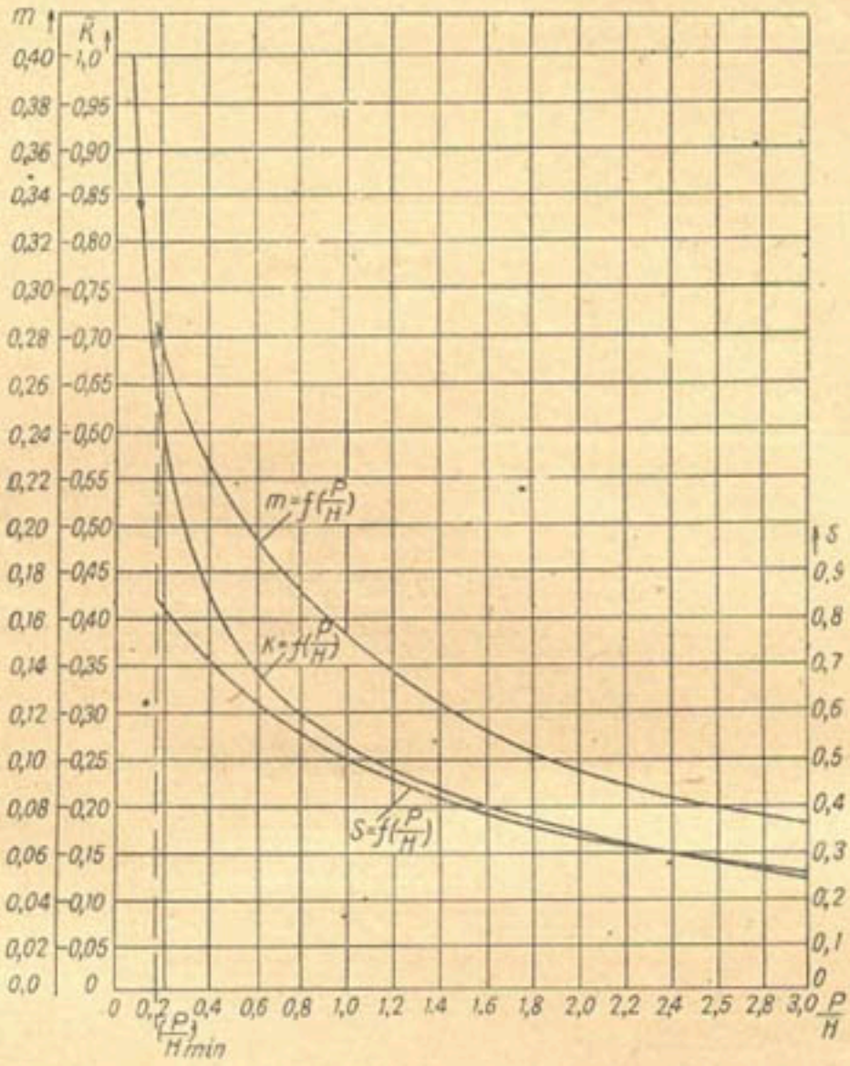


Рис. 4. График зависимости $m = f\left(\frac{p}{H}\right)$, $k = f\left(\frac{p}{H}\right)$ и $s = f\left(\frac{p}{H}\right)$.

сительной ширины водослива. Мы полагаем на основании оценки и обработки опытных данных, что отсутствие учета этого фактора может вызвать ошибку в пределах $\sim \pm 3\%$.

При необходимости более точных расчетов влияние относительной ширины пролета можно учесть следующим образом. Отступая от нашего допущения, принимаем

$$П_{2_{сж}} = \Delta П_{2_{пл}},$$

где $\Delta = 1{,}06 - 0{,}015\ \frac{b}{H}$,

причем поправка Δ вводится в пределах значений $\frac{p}{H}$ от 0 до 10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рядова З. И. ДАН УзССР, 1956, № 2.
2. Рядова З. И. Труды САНИИРИ, вып. 94, Ташкент, стр. 85, 1958.

Р. В. ТИМИРОВА

СОВМЕЩЕННАЯ СХЕМА ВОДОЗАБОРА ФЕРГАНСКОГО ТИПА С ДОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Для горных рек (участок с уклоном 0,01—0,05) с развитой поймой характерно извилистое русло, разветвленное на отдельные рукава, которые довольно часто меняют свое положение после прохождения паводков. Берега их пологие, а в отдельных местах и крутые. Коренные берега сложены из скальных пород или конгломератов, покрытых сверху супесями, русло — из обломков скал, валунов, булыжника и гравия с песком.

Большинству горных рек свойственны прохождение быстро возникающих, кратковременных паводков, несущих большое количество донных и взвешенных наносов, а также плавника; большие скорости потока; относительно малые глубины; значительная амплитуда колебания расходов и горизонтов воды (годичных, месячных и даже суточных); отсутствие ледостава и наличие шуговых явлений в зимний период.

В настоящее время в условиях Средней Азии, по литературным данным, единственным типом горного водозабора, наиболее полно отвечающим специфике горных рек, является водозабор с донной решеткой (ВДР).

Однако, как показывают опыт эксплуатации, исследования в натурных условиях и на моделях, проведенные сотрудниками Институтов водного хозяйства и энергетики КиргССР и КазССР, а также наши обследования на реках Киргизии и Казахстана в 1960 г., водозабор с донной решеткой наряду с достоинствами обладает рядом существенных недостатков, являющихся типичными для данного типа водозабора:

1) сильной засоряемостью решетки;

2) захватом водоприемной галереей большого количества наносов вследствие того, что через решетку проваливаются наносы бо́льшего диаметра, чем просвет решетки;

3) трудностью эксплуатации водозабора в зимний период.

Анализируя работу построенных ВДР (на реках Каракол, Джаргалы, Каинда, Чон-Кызылсу, Туюксу, Кара-Балта в Киргизии, на реках Большая Алматинка и Малая Алматинка в Казахстане) и используя данные натурных исследований, проведенных сотрудниками Киргизского филиала Академии наук СССР на реках Киргизии, мы установили, что

1) захват наносов донной галереей по фронту решетки возрастает по мере удаления его от точки водозабора;

2) более крупные фракции двигаются ближе к водозабору, а более мелкие удалены от него.

По нашему мнению, вышеуказанные явления связаны непосредственно с переформированием русла в районе сооружения, возникновению которого способствует несоответствие ширины водоприемных пролетов сооружения устойчивой ширине бытового русла, наличие пониженного порога водоприемника и связанное с этим перераспределение удельных расходов по фронту сооружения [6], наличие некоторой кривизны естественного русла.

Мы считаем, что для улучшения условий водозабора и соответственно устранения основных недостатков, присущих ВДР, необходимо, используя принцип поперечной циркуляции потока, выбрать наиболее рациональную компоновку узла, обеспечивающую устойчивый зарегулированный подход потока к сооружению и отвлечение донных наносов от водоприемника.

Создание поперечной циркуляции потока должно вызвать искусственное расслоение потока, т. е. его винтообразное движение независимо от формы его русла в плане, и тем самым заставить поток донных наносов отклониться от первоначального пути в заранее заданном направлении.

В настоящее время существует несколько методов создания поперечной циркуляции потока перед сооружением.

1. Направляющая система проф. М. В. Потапова, размещенная в потоке перед входом в отвод, вызывает искусственное расслоение потока с возбуждением в нем поперечной циркуляции, при этом верхние слои потока направляются в отвод, а нижние отклоняются от него.

2. Неравномерное распределение удельных расходов по всей ширине русла по методу проф. Р. Ж. Жулаева создается путем устройства донного порога с переменной по ширине русла высотой. Наличие в сливной части плотины щитового отверстия с пониженным порогом позволяет возбудить в верхнем бьефе водозаборного узла поперечную циркуляцию потока.

3. Схема водозабора ферганского типа, разработанная САНИИРИ, основана на поперечной циркуляции потока, создаваемой зарегулированным подводящим руслом криволинейного очертания в плане.

Методы создания поперечной циркуляции потока перед сооружением разработаны также Д. Я. Соколовым, П. Н. Суровым, К. Г. Липатовым, Н. Ф. Данелия и многими другими.

Учитывая специфику горных рек (блуждание потока по всей ширине поймы и соответственно возможности неблагоприятного и неустойчивого подхода потока к сооружению) и необходимость использования поперечной циркуляции потока для борьбы с донными наносами, мы приняли ферганскую схему водозабора, обеспечивающую организованный, устойчивый подход потока к сооружению и отвлечение донных наносов от водоприемника вследствие возникновения поперечной циркуляции потока в зарегулированном подводящем русле. Эта схема нашла широкое применение для горно-предгорных рек в условиях Средней Азии.

Предложенная нами в начале 1959 г. схема водозаборного узла удовлетворяла основным требованиям, предъявляемым к водозабору с донной решеткой; она представляла собой криволинейное зарегулированное подводящее русло, создающее поперечную циркуляцию потока, которая обеспечивает сброс донных токов, насыщенных наносами, в нижний бьеф и подачу поверхностных осветленных токов в регулятор, расположенный на вогнутом берегу. Причиной возникновения поперечной циркуляции потока на изгибе русла является неравно-

мерность распределения продольных скоростей потока по глубине, вызывающая неодинаковость центробежных сил инерции у поверхности и у дна потока. Поверхностные струи с максимальной скоростью, следовательно и с максимальными центробежными силами инерции, набегая на вогнутый берег, создают повышенные уровни и теснят донные струи вместе с влекомыми ими донными наносами к противоположному выпуклому берегу [4]. Однако с уменьшением расходов, проходящих по реке, и с увеличением процента водозабора действие поперечной циркуляции, создаваемой криволинейным руслом, заметно ослабевает.

Для усиления поперечной циркуляции потока от правой струенаправляющей дамбы в поток под углом 30° выдвинута наносоотбойная вертикальная стенка. При натекании потока на стенку каждая частица потока будет оказывать избыточное давление на объем жидкости, находящейся перед стенкой. Движение жидкости этого объема будет совпадать по направлению с движением натекающего потока, а у дна оно будеть иметь обратное направление. Вследствие неразрывности потока перед стенкой возникают вертикальные токи, образующие вместе с горизонтальными токами циркуляционное движение.

Так как винт поперечной циркуляции потока, создаваемый зарегулированным подводящим руслом, имеет тот же знак, что и винт, образуемый наносоотбойной стенкой, выдвинутой в поток от вогнутого берега, то и движения их должны совпадать. Таким образом, наносоотбойная стенка является фактором, поддерживающим движение винта поперечной циркуляции потока, создаваемого зарегулированным подводящим руслом, и усиливающим его интенсивность. Водоприемный порог, выдвинутый от наносоотбойной вертикальной стенки в поток под углом 165°, в свою очередь, еще более усиливает поперечную циркуляцию на подходе к сооружению. Созданная таким образом мощная циркуляция потока на подходе к сооружению должна обеспечить максимальный безнаносный водозабор.

Разработанный нами водозаборный узел в окончательном варианте (рис. 1) состоял из зарегулированного подводящего русла криволинейного очертания в плане *1*; наносоотбойной стенки *8*; водоприемного порога *6* с регулятором канала, расположенным на вогнутом берегу; разборчато-щитовой части плотины *2*; автоматического сброса *3*, примыкающего к выпуклому берегу.

Криволинейное зарегулированное подводящее русло служит в основном для создания стабильного подхода потока к сооружению и распределения наносов по всей его ширине русла и представляет собой суженное криволинейными струенаправляющими дамбами естественное русло. Правая струенаправляющая дамба имеет радиус кривизны 5 $B_у$ = 105 *м* и заканчивается оголовком, а левая струенаправляющая дамба идет параллельно правой и упирается в коренной берег. Зарегулированное подводящее русло рассчитано на пропуск максимального расхода $Q_{0,1\%}$ = 239 *м³/сек*; ширина устойчивого русла — на $Q_{10\%}$ = 169 *м³/сек* и составляет $B_з$ = 20 *м*, длина зарегулированного русла — 4,5 *м*, $B_у$ = 87 *м*.

Наносоотбойная вертикальная стенка, выдвинутая в потолок под углом 30° от правой струенаправляющей дамбы, выполняет роль фактора-усилителя поперечной циркуляции, создаваемой зарегулированным подводящим руслом. Стенка выполнена в виде вертикальной грани, положенной на откос струенаправляющей дамбы (рис. 1, 2). Длина стенки равна 13,5 *м*. Конец стенки плавно сопряжен с устоем регулятора. Радиус сопряжения стенки с устоем — 3 *м*.

Водоприемо существляется через порог, примыкающий одним концом к наносоотбойной стенке под углом 165°, а другим — к среднему бычку разборчато-щитовой части плотины. Высота порога составляет 1,5 *м*, длина — 10 *м*. Такое расположение водоприемного порога усиливает поперечную циркуляцию потока, создаваемую зарегулированным подводящим руслом и наносоотбойной стенкой. Регулятор расположен за водоприемным порогом и состоит из двух пролетов, рассчитанных на пропуск расхода 30 *м*³/*сек*. Ширина каждого пролета равна 3,0 *м*,

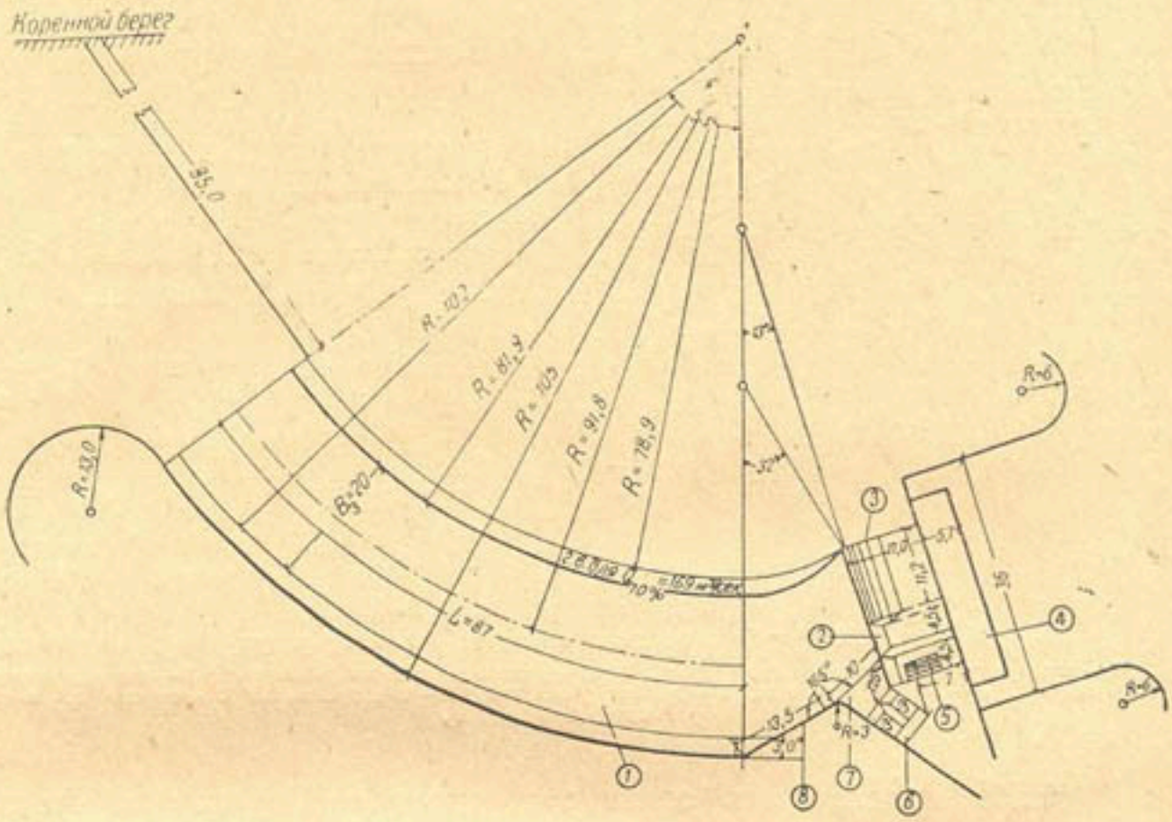


Рис. 1. Общая схема водозаборного узла:

а — разрез по автоматическому сливу; *б* — разрез по левому пролету разборчато-щитовой части плотины; *в* — разрез по правому пролету разборчато-щитовой части плотины; *г* — разрез по водоприемному порогу; *д* — разрез по фронту плотины; *е* — сечения наносоотбойной стенки.

толщина бычка — 1,0 *м*. Регулятор расположен по отношению к фронту плотины под углом 125°. Высота порога регулятора над средним дном реки составляет 0,7 *м*. Водозабор через регулятор осуществляется в период прохождения больших расходов.

Разборчато-щитовая часть плотины служит для регулирования расходов и горизонтов и состоит из двух пролетов, каждый из которых рассчитан на пропуск расхода $Q_{50\%} = 105$ *м*³/*сек*. Ширина отверстия пролета равна 4,0 *м*, толщина бычка — 1,0 *м*. Порог левого пролета плотины заложен на отметке среднего дна реки, а порог правого пролета на 0,7 *м* выше порога левого пролета плотины. Левый пролет выполняет роль сбросного отверстия, а правый — и сбросного и водозаборного отверстий, для чего в правой части пролета расположена решетка длиной 6,0 *м* и шириной 3,0 *м*. Решетка рассчитана на пропуск расхода 23,8 *м*³/*сек*. Водозабор через решетку осуществляется при прохождении по реке меженных расходов и при сравнительно малом проценте водозабора.

В период прохождения по реке малых расходов сброс в нижний бьеф будет настолько незначителен (вернее, высота поднятия щита настоль-

ко невелика), что наносы, не имея возможности проскользнуть в нижний бьеф, начнут накапливаться перед сбросным отверстием, а затем, постепенно завалив водоприемный порог, проникать в регулятор.

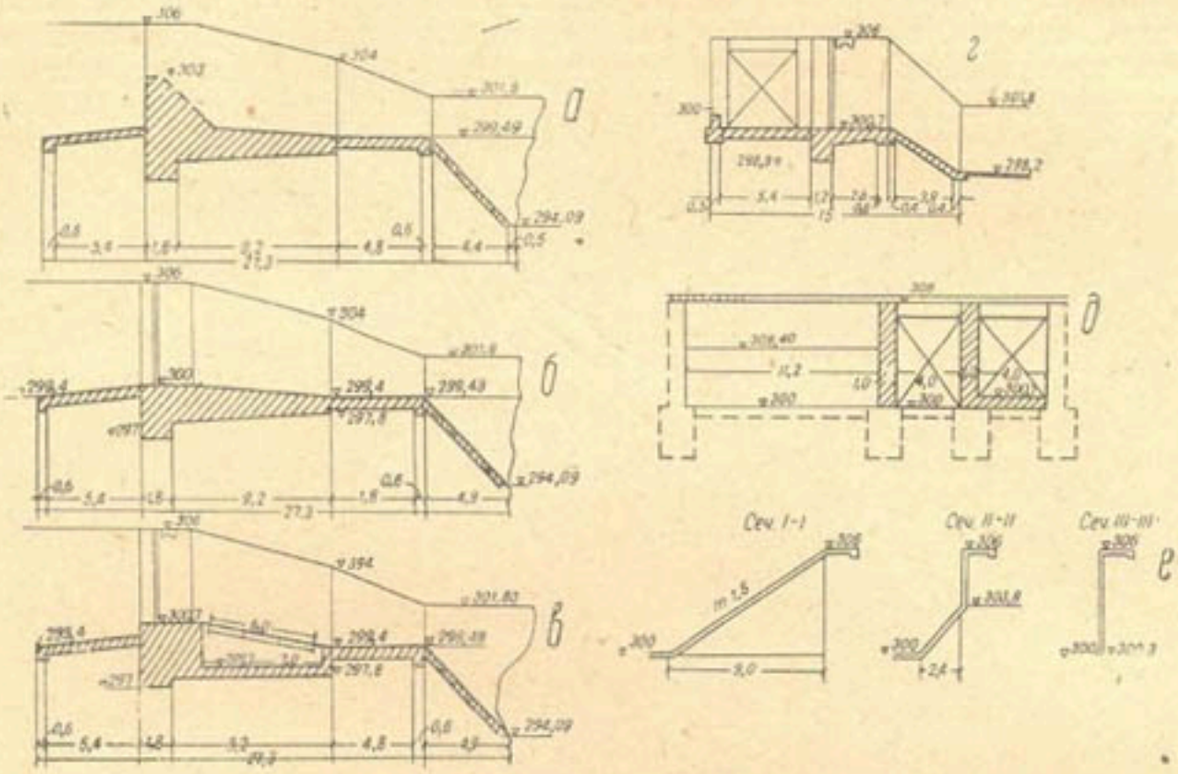


Рис. 2. Разрезы и сечения по водозаборному узлу:

1 — зарегулированное подводящее русло; *2* — разборчато-щитовая часть плотины; *3* — автоматический водослив; *4* — водобойный пол; *5* — донная решетка; *6* — водоприемник; *7* — порог; *8* — наносоотбойная стенка.

Чтобы предупредить завал водоприемного порога и обеспечить поступление донных наносов в регулятор, необходимо в период прохождения малых расходов по реке закрыть наглухо регулятор, расположенный на вогнутом берегу, и левый пролет плотины; при этом весь поток, проходящий по руслу, направится в открытый правый пролет плотины и водозабор можно будет осуществлять через решетку.

Автоматический водослив служит для пропуска внезапных паводковых расходов и расположен на одном фронте с разборчато-щитовой частью плотины. Гребень автоматического водослива заложен на отметке НПГ (нормально-подпертый горизонт). Напор при НПГ равен 3,0 *м*, длина водослива — 11,0 *м*.

Рациональность предложенной нами схемы водозаборного узла проверяли по результатам исследования этой схемы на модели.

Лабораторные исследования проводили на пространственной размываемой модели масштаба 1:30. Моделирование принято по теории гравитационного подобия.

Русло модели сложено из чирчикского речного песка (табл. 1).

Исследования проводили для уклонов русла 0,01—0,02 при расходе $Q_{50\%}=105$ *м*³/*сек* (21,3 *л*/*сек*) и проверяли при меньших расходах. Кроме изучения работы узла при расходах 105 *м*³/*сек* (21,3 *л*/*сек*), 60 *м*³/*сек* (12,2 *л*/*сек*), 40 *м*³/*сек* (8,1 *л*/*сек*) и 24 *м*³/*сек* (4,87 *л*/*сек*) для полной оценки работы узла был пропущен расход $Q_{3\%}=203$ *м*³/*сек* (41,2 *л*/*сек*).

Расходы 105, 60, 40 и 203 *м³/сек* пропускали при постоянном водозаборе, который составлял 30 *м³/сек* (6,1 *л/сек*), а затем при пропуске расхода 24 *м³/сек* процент водозабора изменялся от 75 до 85%.

При водозаборе до 85% поступление наносов в канал не наблюдалось (рис. 3). При 85-процентном водозаборе сброс воды в нижний бьеф был так ничтожен —3,5 *м³/сек* (0,72 *л/сек*), что высота поднятия

Таблица 1

Фракционный состав песка, слагающего русло модели

Содержание фракций	Диаметр фракций, *мм*												Всего
	19—10	10—7	7—6	6—5	5—4	4—3	3—2	2—1	1—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1	<0,1	
Весовое, *г*	75	219	113	88	173	165	188	231	204	468	68	8	2000
Процентное	3,75	10,95	5,65	4,40	8,65	8,25	9,4	11,55	10,2	23,4	3,4	0,4	100
Нарастающий итог, %	3,75	14,7	20,35	24,75	33,4	41,65	51,05	62,60	72,8	96,2	99,6	100	—

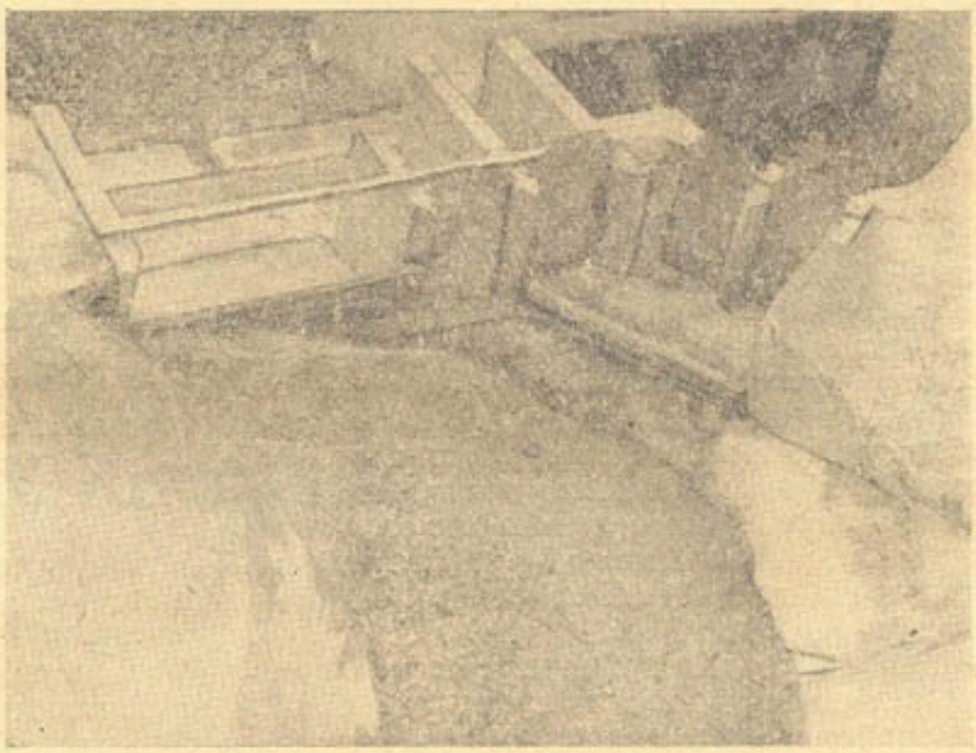


Рис. 3. Состояние верхнего бьефа после прохождения расхода 24 *м³/сек* и при 75-процентном водозаборе.

щита (на модели) не превышала 0,5 *см*, поэтому наносы (максимальный диаметр движущихся наносов достигал 0,5 *см*), накапливаясь перед сбросным отверстием и забивая его, прекращали сброс воды в нижний бьеф. В результате наносы постепенно заносили порог и поступали в регулятор.

Результаты исследований модели водозабора представлены в табл. 2.

Таблица 2

Некоторые результаты исследований модели водозабора

Процент обеспеченности	Данные натуры: расход воды в реке, $м^3/сек$	Данные натуры: расход водозабора в отвод, $м^3/сек$	Данные модели: расход воды в русле, $л/сек$	Данные модели: расход водозабора в отвод, $л/сек$	Процент водозабора	Насыщенность потока донными наносами, $г/л$	Общее количество наносов, подаваемых в русло, $г/сек$	Средний диаметр смеси, подаваемой в русло, $мм$	Количество наносов, уловленных в нижнем бьефе, $г/сек$	Средний диаметр уловленных наносов в нижнем бьефе, $мм$	Количество наносов, уловленных в отводе, % от общего количества наносов в русле	Ширина полосы порога, чистой от наносов, $см$
3	203	30	41,2	6,1	14,7	4,55	187,5	3,81	202,3	2,35	—	11—13
50	105	30	21,3	6,1	28,6	2,93	62,4	2,35	63,0	2,25	—	11—9
90	60	30	12,2	6,1	50	2,56	31,2	2,02	30,3	1,96	—	11—9
99	40	30	8,1	6,1	75	1,03	8,34	1,96	8,18	1,07	—	7—2,5
99,9	24	18,0	4,87	3,65	75	0,85	4,1	1,07	4,1	0,91	—	11—5
99,9	24	20,4	4,87	4,14	85	0,85	4,1	1,07	4,1	0,91	4,9	—

ВЫВОДЫ

В результате лабораторных исследований модели совмещенной схемы водозабора ферганского типа с донной решеткой установлено следующее.

1. Поперечная циркуляция потока, возникающая в зарегулированном подводящем русле, при обычной схеме ферганского типа водозабора обеспечивает безнаносный водозабор до 50—60%.

2. Новый элемент, введенный в ферганский тип водозабора, —наносоотбойная вертикальная стенка, выдвинутая в поток, — в сочетании с порогом, несколько повышенным против обычного, усиливает поперечную циркуляцию потока, создаваемую зарегулированным подводящим руслом, и обеспечивает 85-процентный безнаносный водозабор.

3. Отличие данной схемы от других, предложенных ранее, заключается в том, что

а) борьба с наносами в данной схеме осуществляется путем применения относительно простых и открытых элементов (наносоотбойной вертикальной стенки и порога), при правильной компоновке и размещении которых обеспечивается относительно высокий процент безнаносного водозабора;

б) данная схема представляет собой двухголовый водозабор. При прохождении по реке больших расходов, когда река несет большое количество наносов, водозабор осуществляется через регулятор, расположенный на вогнутом берегу.

При прохождении по реке малых расходов (менее 25 $м^3/сек$) и при сравнительно малом проценте водозабора (50—60%) водозабор будет осуществляться только через решетку, расположенную в правой части правого пролета разборчато-щитовой части сооружения.

4. Предложенную нами схему можно рекомендовать для применения на горно-предгорных участках рек с уклонами 0,01—0,05 и при расходах 100—200 $м^3/сек$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Замарин Е. А., Фандеев В. В. Гидротехнические сооружения, М., Сельхозгиз, 1954.
2. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения, М., Гос. изд-во по строит. и архит., 1955.
3. Рамазан М. С. Некоторые особенности гидрологического режима и гидротехническая классификация рек Киргизии, Фрунзе, АН КиргССР, 1960.
4. Якштас И. А. О водозаборе в предгорной зоне, Труды САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958.
5. Ушаков А. П., Шолохов В. Н. Ферганский тип водозабора применительно к условиям снегово-дождевого питания источника, Труды САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958.
6. Понер П. А. Вопросы деформации русла у водозаборных узлов с донной решеткой, Труды Всесоюзного научно-технического совещания по водозаборным сооружениям и русловым процессам, т. II, Тбилиси, 1960.
7. Юшманов О. Л. Инерционная циркуляция в водоприемниках и деривационных сооружениях ГЭС, М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.
8. Потапов М. В. Регулирование водных потоков методом искусственной поперечной циркуляции, М.—Л., АН СССР, 1947.
9. Алтунин С. Т. Регулирование русел рек при водозаборе, М., Сельхозгиз, 1950.
10. Потапов М. В. Поперечная циркуляция в открытом потоке и ее гидротехнические применения, Сборник статей под ред. М. В. Потапова, М., Сельхозгиз, 1936.
11. Якштас И. А., Прасолова А. Т. „Гидротехника и мелиорация", 1952, № 2.

Р. А. АЛИМУХАМЕДОВ

К ВОПРОСУ О ВНУТРИСИСТЕМНЫХ ОТСТОЙНИКАХ

Источниками питания большинства ирригационных систем в Средней Азии являются реки, транспортирующие большое количество взвешенных и донных наносов. Оседая в оросительных каналах, наносы уменьшают их пропускную способность, что нарушает нормальное водораспределение и вызывает необходимость ежегодного проведения большого объема земляных работ по очистке каналов.

Только по оросительным системам УзССР объем ежегодной очистки каналов от наносов достигает 46 млн. $м^3$, при этом около 30 млн. $м^3$ очистительных работ приходится на системы, питающиеся водами Аму-Дарьи. Одним из основных недостатков современных ирригационных систем в низовьях Аму-Дарьи является интенсивное заиление оросительных каналов.

Магистральная и межхозяйственная сети очищаются преимущественно машинами, а внутрихозяйственная сеть — вручную. Русла каналов очищаются по всей длине. Но это затрудняет работу механизмов, нарушает кольматационный слой и увеличивает фильтрационные потери в каналах.

В настоящее время в разрабатываемых проектах предусматривается незаиляемость всех звеньев ирригационных систем. Для достижения незаиляемости магистральной и межхозяйственной сетей рекомендуются специальные установки на реках струенаправляющих систем; чтобы не допустить в каналы часть взвешенных и наиболее крупных фракций наносов применяются головные и внутрисистемные отстойники.

Для условий Аму-Дарьи, несущей значительное количество мелких фракций наносов с незначительной примесью крупных частиц, необходимы мероприятия по борьбе с заилением внутрисистемной сети, которые могут быть достигнуты путем увеличения уклонов каналов при одновременном улучшении командования над орошаемыми полями в бесподпорных условиях, а также в результате устройства внутрисистемных отстойников.

Незначительный общий уклон местности требует увеличения уклона каналов, которое может происходить за счет приподнятия значительной части оросительных каналов над поверхностью земли. Это в условиях разбросанности орошаемых земель потребует много времени и больших объемов земляных работ.

Следовательно, строительство внутрисистемных отстойников освобождает колхозников от очистки вручную внутрихозяйственной сети.

Расчет внутрисистемных отстойников. При определении размеров внутрисистемных отстойников необходимо учитывать следующие исходные данные:

1) содержание и состав взвешенных наносов, поступающих в отстойники; 2) объем влекомых наносов, попадающих в отстойник; 3) расход воды, пропускаемый через отстойник, и горизонт воды в подводящем и отводящем каналах; 4) топографическую характеристику места расположения отстойника: 5) протяженность каналов, измеряемую по топографическим картам или планам местности.

Состав взвешенных наносов, поступающих в отстойник, постоянно колеблется и зависит от гидравлических характеристик твердого стока и источника питания систем (рек), вычисляемых по данным гидрологических станций; процента осветления воды в вышележащих звеньях каналов, определяемого путем расчета или по данным эксплуатационной службы; наличия на головном регуляторе или при входе в отстойник специальных сооружений (щит Потапова, сбросы, порог специальных конструкций и др.), которые не допускают в отстойник часть взвешенных и донных наносов (величина наносов устанавливается специальными расчетами); от величины фильтрационных потерь, определяемой либо расчетным путем, либо по данным фактических замеров.

Транспортирующая способность защищаемых каналов зависит от их гидравлических элементов, различных в каждом отдельном случае, и может быть определена в результате расчетов или опытным путем.

Коэффициент полезного действия защищаемой сети, устанавливаемый путем фактических замеров или по данным гидрометрической службы органов водного хозяйства, является величиной переменной и зависит от расхода воды, протяженности канала и водопроницаемости его грунта, мутности воды, зарастания, сечения и гидравлических элементов канала.

Условия зарастания каналов в месте строительства отстойника определяются тепловым режимом, ботаническими условиями, возможностями тех или иных растений (камыши, водоросли, грибы и др.), а также минерализацией воды.

Степень мутности и состав наносов по-разному влияют на светопроницаемость воды, так как при одной и той же мутности могут быть разные составы наносов.

Расходы воды, проходящие через отстойник, будут определяться графиком водозабора, установленным планом водопользования для хозяйств, расположенных ниже отстойника. Причем потребность хозяйств в воде, вследствие неопределенности ряда величин, являющихся исходными данными при составлении планов водопользования, часто не соответствует плановой водоподаче, ввиду чего происходит завышение планового водозабора. Это должно учитываться при определении по форсированному водозабору основных размеров отстойника согласно нормам технических указаний по проектированию каналов оросительных систем.

Объем поступающих в отстойник донных наносов определяется условиями водозабора, планового и высотного положения регулятора и его конструкции, режима потока на участке выше точки водозабора на расстоянии $l = (8-10) \cdot b$ от точки водозабора, где b — ширина канала, из которого забирается вода.

Донные наносы в условиях низовьев Аму-Дарьи ориентировочно могут быть приняты равными примерно 10% от объема поступающих в отстойник взвешенных наносов.

Методы и порядок расчета внутрисистемных отстойников. Для определения размеров отстойника прежде всего необходимо найти требуемый процент осветления, т. е. так установить величину снижения нагрузки от наносов, поступающих в отстойник, чтобы нагрузка, выпускаемая из отстойника, соответствовала транспортирующей способности защищаемых каналов. Процент осветления вычисляем по формуле

$$P = (1 - \omega) \cdot 100,$$

$$\omega = \frac{\rho_{вых}}{\rho_{вх}},$$

где $\rho_{вых}$ — мутность воды при выходе из отстойника, *кг/м³*;

$\rho_{вх}$ — мутность воды при входе в отстойник, *кг/м³*.

С целью выполнения поставленного условия по заданным гидравлическим элементам каналов находим при помощи следующих формул их транспортирующую способность.

1. Формула В. В. Пославского [3], рекомендуемая в технических условиях проектирования каналов оросительных систем:

$$\rho = \frac{2d}{\overline{w}} R I_0, \quad I_0 = 1000 \cdot I;$$

здесь $d = 0{,}55 \div 0{,}85$ (меньшее значение d принимается при $Q < 1$ *м/сек*³);

R — гидравлический радиус, *м*;

$\overline{w}$ — средняя гидравлическая крупность, *мм/сек*;

I — уклон поверхности воды.

2. Формула С. А. Абальянца [3], рекомендуемая ИВПиГ для расчета каналов при $Q < 1$ *м³/сек*:

$$\rho = 18 \frac{v^3}{R\overline{w}}$$

(v — скорость течения воды, *м/сек*).

3. Формула Г. О. Хорста [3]:

$$\rho = \frac{45 v^{3/2} R^{1/2} I}{\overline{w}}.$$

4. Формула И. И. Горошкова [3]:

$$\rho = 6420 \frac{I^{3/2} \cdot R^{1/2}}{\overline{w}} \left(1 - \frac{v_0}{v}\right) \cdot M$$

при $Q < 4$ *м³/сек*,

где $\left(1 - \frac{v_0}{v}\right)$ — множитель, определяющий возможность переноса наносов данной крупности при определенных минимальных скоростях;

M — параметр, учитывающий размер потока;

v—минимальная скорость, вычисляемая по формуле В. Н. Гончарова

$$v_0 = v_1 h_{ср}^{0,2};$$

$h_{ср}$ — средняя глубина потока, *м*;

v_1 — скорость, при которой происходит осаждение частиц данной крупности при глубине потока в 1 *м*.

Связь $v_1 = f(\overline{w})$, установленная в результате опытов В. Н. Гончарова, может быть выражена так:

$$v_1 = 1,2\overline{w}^{\frac{2}{7}}$$

Параметр, учитывающий размер и форму поперечного сечения потока, а также величину пропускаемого расхода, представляется в виде

$$M = A\left(\frac{R}{h_{ср}}\right)^p;$$

а) для каналов с расходом более 4 *м*³/*сек*

$$M = \left(\frac{R}{h_{ср}}\right)^4 \cdot A;$$

б) для каналов с расходом менее 4 *м*³/*сек*

$$M = 0,63\,Q^{1/3}\left(\frac{R}{h_{ср}}\right)^4.$$

Установив по одной из вышеприведенных формул транспортирующую способность защищаемых каналов и процент осветления в отстойнике, находим основные размеры отстойника (длину, размеры поперечного сечения).

Выбор метода расчета зависит от того, будет ли поток находиться в турбулентном или ламинарном состоянии.

При скоростях в отстойнике более 0,10 *м/сек* число Рейнольдса $R_e = \frac{hv}{\nu}$ будет всегда больше критического; в этом случае расчет следует вести по формулам турбулентного режима, т. е. с учетом взвешивающей способности потока в отстойнике (взвешивающая способность есть свойство турбулентного потока удерживать устойчиво определенное количество наносов заданного состава во взвешенном состоянии).

При скорости менее 0,10 *м/сек* взвешивающая способность будет незначительна и ею можно пренебречь.

Расчет процесса отстаивания в отстойниках со скоростями более 0,1 *м/сек* может проводиться по методу А. Н. Гостунского и А. Г. Хачатряна [3].

Сопоставляя расчетные методы отстаивания в отстойниках с данными натурных наблюдений, выполненных в САНИИРИ, Н. Ф. Цветикова установила, что наиболее эффективным является метод А. Н. Гостунского, учитывающий взвешивающую способность турбулентного потока. Сравнение же этого метода с результатами работы действующих отстойников на каналах Пахта-Арна им. Ленина в системе ККАССР и на канале Совет-Яб ТуркССР показало, что расхождение

расчетных данных с натурными данными не превышает 12% при определении длины отстойника и 5—6% — степени осветления потока.

При расчете отстойников со скоростью течения менее 0,10 *м/сек* можно применять формулу Д. Я. Соколова, которая не требует выполнения большого объема вычислительных работ и с достаточной точностью отражает явления процесса осаждения наносов. Эта формула имеет следующий вид:

$$L = 1{,}2\frac{v \cdot h}{w},$$

где v — скорость течения воды в отстойнике, *м/сек*.

h — глубина наполнения в отстойнике, *м*;

w — гидравлическая крупность твердых частиц, *мм/сек*.

Внутрисистемные отстойники строятся в головных участках межхозяйственных каналов, подающих воду в одно или несколько хозяйств с расходами 1,5 — 10 *м³/сек*.

При строительстве внутрисистемных отстойников для размещения вынутых из отстойника отложений выбираются места с пересеченной местностью (овраги, котлованы и др.). В случае отсутствия таких мест размещение отложений рекомендуется производить вдоль отстойника на расстоянии до 0,5 *км* от бровки. При этом необходимо учитывать дальнейшую планировку отложений бульдозерами, скреперами.

Уклоны защищаемых каналов могут быть различны в зависимости от рельефа местности, в которой расположены хозяйства. В условиях низовьев р. Аму-Дарьи уклоны, определяемые путем нивелирования или по плану с горизонталями, в основном изменяются в пределах от $i = 0{,}0002$ до $i = 0{,}0003$. Наименьшей транспортирующей способностью обладают каналы с расходами

$$Q = 0{,}08 \div 0{,}20 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Рассмотрим режим работы и транспортирующую способность каналов, имеющих следующие гидравлические элементы (при равномерном режиме):

$$Q = 0{,}200 \text{ м}^3/\text{сек}, \quad m = 1{,}5, \quad b = 1{,}0 \text{ м},$$

$$h = 0{,}49 \text{ м}, \quad R = 0{,}313 \text{ м}, \quad n = 0{,}0275, \quad v = 0{,}23 \text{ м/сек}.$$

Расчет транспортирующей способности и требуемого процента осветления по вышеуказанным формулам сведен в табл. 1.

В табл. 1 ρ — мутность, которую может транспортировать защищаемый канал;

w_0 — средняя гидравлическая крупность состава при входе в отстойник, $w_0 = 0{,}81$ *мм/сек*;

ρ_0 — мутность на входе в отстойник, равная 3,96 *кг/м³*;

η — коэффициент полезного действия системы, составляющий 0,62;

P — процент осветления; $P = (1 - \omega)\,100$.

Предварительную длину отстойника по данным об уклонах защищаемых каналов рекомендуем определять таким образом:

Уклоны защищаемых внутрихозяйственных каналов	Скорость в защищаемом канале, *м/сек*	Длина отстойника, *м*
0,0002—0,0003	0,17—0,30	600
0,0003—0,0005	0,20—0,35	500
0,0005—0,001	0,25—0,45	300
0,001 —0,003	0,30—0,60	200

Таблица 1

Вид формулы	Параметр*				
	$\rho\bar{w}$	$\frac{\rho\bar{w}\eta}{10^3}$	$\frac{h}{h_0} = \frac{\rho\bar{w}\eta}{\rho_0 w_0}$	P, %	ρ, *кг/м³*
$\rho = 18\frac{v^3}{R\bar{w}}$	0,70	0,46	0,143	44	3,38
$\rho = \frac{2d}{w} IR$	0,69	0,45	0,143	44	3,38
$\rho = \frac{45v^{3/4}R^{1/4}I}{\bar{w}}$	0,50	0,37	0,116	50	2,70

* Результаты параметров определены по методу А. Н. Гостунского.

Глубина наполнения (h) во внутрисистемных отстойниках равна 2 *м*, погонный расход (q) — 0,2 *м³/сек*, откосы (m) = 1,5 ÷ 2,0. Средняя ширина отстойника назначается в зависимости от расхода канала, на котором располагается отстойник, и определяется по формуле

$$b_{ср} = \frac{Q_p}{q} = 5\ Q_p,$$

где $b_{ср}$ — средняя ширина отстойника, *м*;

Q — расход межхозяйственного распределителя, *м³/сек*.

Ширина отстойника по дну в зависимости от расчетного расхода и величины откоса будет следующей:

	Ширина отстойника по дну, *м*	
м³/сек	при $m = 1,5$	при $m = 2,0$
1	2,0	1,0
2	7,0	6,0
3	12,0	11,0
4	17,0	16,0
5	22,0	21,0
6	27,0	26,0
7	32,0	31,0
8	37,0	36,0
9	42,0	41,0
10	47,0	26,0

Запас над горизонтами воды в отстойниках принимается таким же, как в канале, на котором строится отстойник. Отметка дна отстой-

ника определяется путем вычитания из отметки нормального горизонта воды в канале глубины наполнения в отстойнике, т. е. 2,0 *м*.

Ориентировочный объем очистки за вегетационный период устанавливается по формуле

$$w = 15000\ Q_p,$$

где w — объем осевших наносов, *м*³;
Q_p — расход отстойника, *м*³/*сек*.

Пример расчета. Определим размеры внутрисистемного отстойника на канале с расходом $Q_p = 2{,}0$ *м*³/*сек* и $i = 0{,}0002$. Длина отстойника равна 600 *м*. Средняя ширина отстойника определяется по формуле следующим образом:

$$b_{ср} = \frac{Q_p}{q} = 5\ Q_p = 5 \cdot 2 = 10\ м.$$

Принимая заложение откосов (m) равным 1,5, а глубину наполнения — 2,0 *м*, определяем по формуле $b = b_{ср} - mh$ ширину отстойника по дну: $b = 10 - 1{,}5 \cdot 2 = 7$ *м*.

При $Q_p = 2{,}0$ *м*³/*сек* и $m = 1{,}5$ ширина отстойника по дну будет также 7 *м*.

Ориентировочный объем очистки находим по формуле

$$w = 15\,000\ Q_p = 15\,000 \cdot 2 = 30\,000\ м^3.$$

Существующая эксплуатация оросительных систем показывает, что сосредоточение всей очистки на головных участках магистральных каналов не дает должного эффекта, а потому строительство внутрисистемных отстойников должно улучшать обеспеченность водоподачи в хозяйствах и гарантировать от заиления внутрихозяйственную оросительную сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические указания по проектированию каналов оросительных систем, МСХ СССР, М., 1955.
2. Хачатрян А. Г. Отстойники на оросительных системах, Сельхозгиз, М., 1957.
3. Труды САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958, стр. 105.

К. А. АВЛЯНОВА

ОБ УЛУЧШЕНИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Техническая эксплуатация оросительных систем охватывает следующие вопросы.

1. Организация управления оросительными системами: а) управление; б) штаты; в) оплата труда; г) права и обязанности основного штата.

2. Производственно-финансовое планирование и отчетность: а) составление планов водопользования и ремонтно-строительных работ; б) подготовительные мероприятия к проведению планов; в) проведение планов водопользования и ремонтно-строительных работ; г) корректировка хозяйственных планов.

3. Поддержание сети и сооружений: а) ремонт гидротехнических сооружений; б) ремонт и содержание канала и его русла; в) ремонт гидропостов, гражданских зданий; г) мероприятия по борьбе с наносами; д) мероприятия по борьбе с потерями воды в каналах.

4. Организация учета и водораспределения: а) эксплуатационная гидрометрия.

5. Различные наблюдения и исследования.

Из перечисленного мы рассмотрим только организацию управления оросительными каналами при оснащении их средствами автоматики и телемеханики (автоматизация учета, регулирование расходов воды и телемеханическое управление водораспределением).

На местах областные управления водного хозяйства выполняют свои функции через системные управления и районные отделы водного хозяйства.

Основная функция управления оросительными системами — забор воды из источника орошения и доведение ее в оптимальных размерах и в оптимальные сроки до орошаемых культур, оказание технической помощи колхозам через районные отделы хозяйства, обеспечение мелиоративного благосостояния земель и сохранности гидротехнических сооружений от порчи и разрушений вследствие заболачивания, засоления, размыва, затопления и других причин.

Технически каждая оросительная система представлена совокупностью каналов и сооружений, расположенных на орошаемой территории.

Границы оросительных систем определяются, как правило, по „ирригационному“ признаку, т. е. в ведении оросительных систем находится один или несколько магистральных каналов со всей последующей оросительной сетью, питающейся из этого магистрального

канала. Но имеются магистральные каналы, обслуживающие более одной оросительной системы. Они могут орошать частично или полностью земли одного или нескольких районов (межрайонные), нескольких областей (межобластные) и даже нескольких республик (межреспубликанские).

Управления межрайонных каналов (УМК) ведают водораспределением между районами, каналами и сооружениями межрайонного значения. Районные производственные участки (РПУ) занимаются водораспределением по каналам внутри района, вплоть до хозяйств, и контролируют использование воды в хозяйствах.

Территория, обслуживаемая УМК и РПУ, довольно велика. Так, орошаемая площадь Правобережного УМК Ташкентского областного управления оросительных систем (ТашоблУОС) составляет 462,3 тыс. *га*, по УМК — колеблется в пределах 35—130 тыс. *га*, РПУ — 10—20 тыс. *га* (табл. 1; рис. 1).

Протяженность и расходы воды крупных каналов также значительны. Имеются каналы $L < 80$ *км* и с пропускной способностью в голове $Q < 130$ *м*³/*сек*.

Оперативное руководство оросительными системами осуществляется через диспетчерскую службу. Диспетчер Министерства водного хозяйства республики связывается с диспетчерами областных управлений при помощи междугородной телефонной связи, областные диспетчеры с диспетчерами УМК — зачастую также через междугородную телефонную связь, что сильно осложняет работу диспетчера. Только некоторые каналы и системы имеют собственную телефонную линию связи. В РПУ диспетчерской службы не имеется. Оперативное руководство водораспределением осуществляется диспетчерами на основе утвержденных планов водопользования.

Для выбора типа и конструирования средств автоматики и телемеханики с целью применения их на магистральных каналах необходимо выявить основные параметры канала и его оперативных сооружений, а именно:

а) техническую характеристику и режим работы канала; б) техническую характеристику оперативных гидротехнических сооружений, их типы, количество, взаимное расположение на канале и режим работы; в) существующую организацию эксплуатации канала.

Особенности канала выявляются отдельно для каждого конкретного случая, но в общих чертах их можно характеризовать следующим образом: магистральные каналы районного, областного, межобластного или республиканского значения; инженерного или неинженерного типа; водообеспеченные и водонеобеспеченные.

Число сооружений на магистральном канале может колебаться в довольно больших пределах — от нескольких десятков до сотен. Характер и взаимное расположение этих сооружений трудно разграничить, но в общем можно сказать, что все сооружения располагаются линейно на расстоянии от 0,5 до 5 *км*, а в некоторых случаях — и более.

Магистральные каналы делятся на оросительные, работающие в основном только в вегетационный период, и оросительно-энергетические, работающие круглый год. Расходы их меняются примерно в пределах, предусмотренных планом водопользования (в зависимости от фактической потребности сельхозкультур и режима источника орошения).

В планах водопользования обычно предусматривается изменение расходов воды в каналах один раз в 5 или 10 дней, фактически

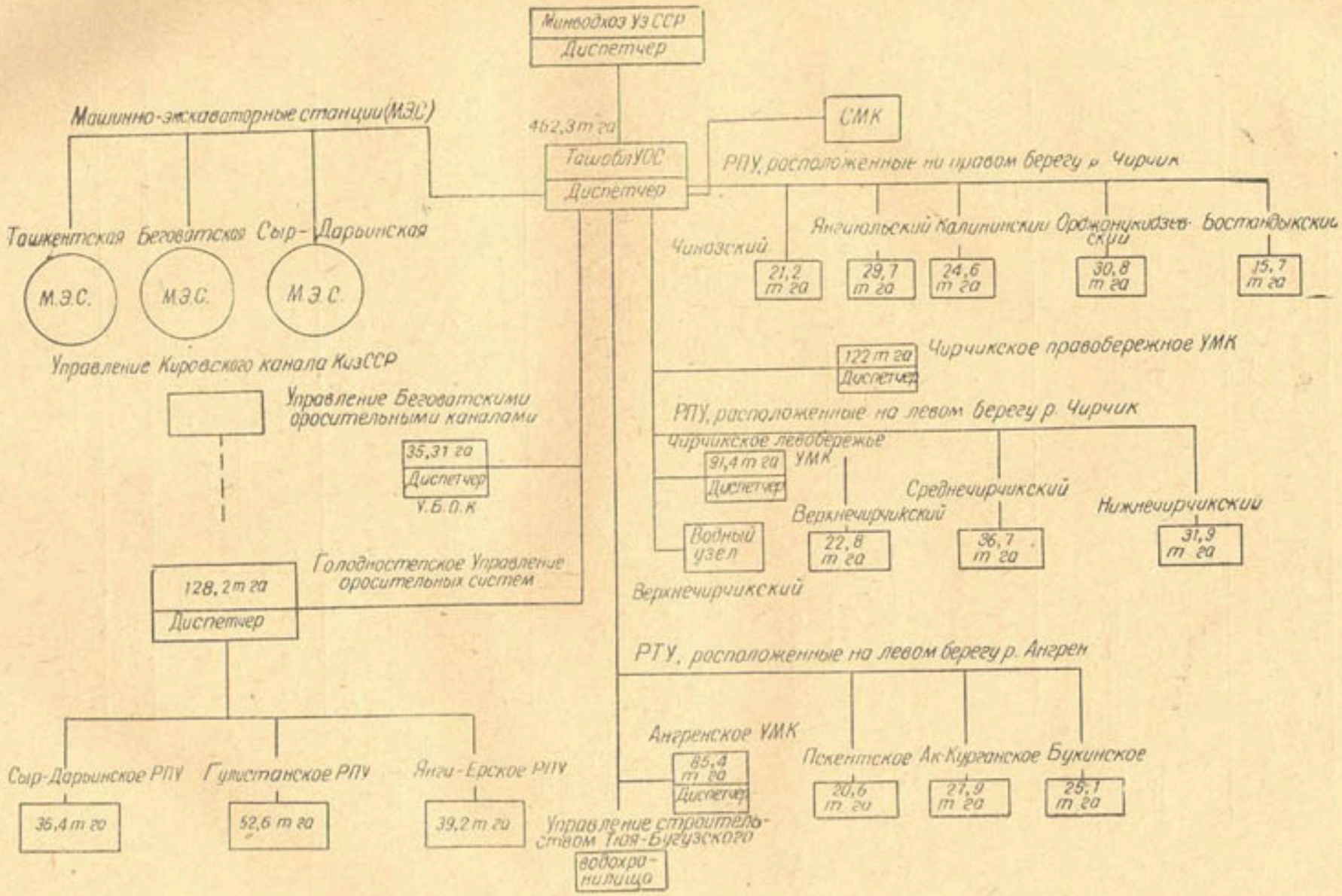


Рис. 1. Структурная схема Ташкентского областного управления оросительных систем.

Таблица 1

Характеристика крупных каналов ТашоблУОС

Наименование УМК и обслуживаемых каналов	Орошаемая площадь, тыс. *га*	Протяженность канала, *км*	$Q_{гол}$, *м³/сек*
Правобережное Чирчикское УМК			
Бозсу	91,3	58	110
Джун	22,7	58	31
Правобережный Карасу	8,9	65	12
Северный Ташканал	8,0	52	12
Верхний Ташканал	5,7	38	7
Итого	136,6		
Левобережное Чирчикское УМК			
Левобережный Карасу	118,6	72,0	126
Большой Ташканал (верхний)	58,1	62,4	65
Моргуненкова	19,2	50,0	25
Бектемир	6,0	18,0	12
Итого	201,9		
Ангренское УМК			
Большой Ташканал (нижний)	43,1	50,0	30,0
Северная ветка Ташканала	5,7	7,5	7,8
Южная » »	9,6	21,0	12,0
Левая » »	2,0	6,0	2,5
Правая » »	8,5	27,0	11,0
Урус	5,9	10,5	6,0
Бурджуар	7,3	27,0	14,4
Ходжабалянд	5,2	12,0	6,0
Шархия	4,2	50,0	15,0
Итого	91,5		
Голодностепское УОС			
Баяутский	39,2	50	48,8
Правая ветка Баяутского	24,4	30	29,9
Правая ветка КМК	39,1	40	44,0
Малекская ветка	10,4	10	11,0
Итого	113,1		
Беговатское УОС			
Беговат	4,8	8	10,5
Дальверзин	30,5	60	73,0
Итого	35,3		
Всего	578,4		

же расходы меняются гораздо чаще, а на некоторых маловодных системах — несколько раз в сутки. Кроме того, фактические расходы значительно отличаются от плановых (рис. 2).

Обычно магистральным каналом управляют в совокупности с другими каналами, входящими в состав УМК или РПУ.

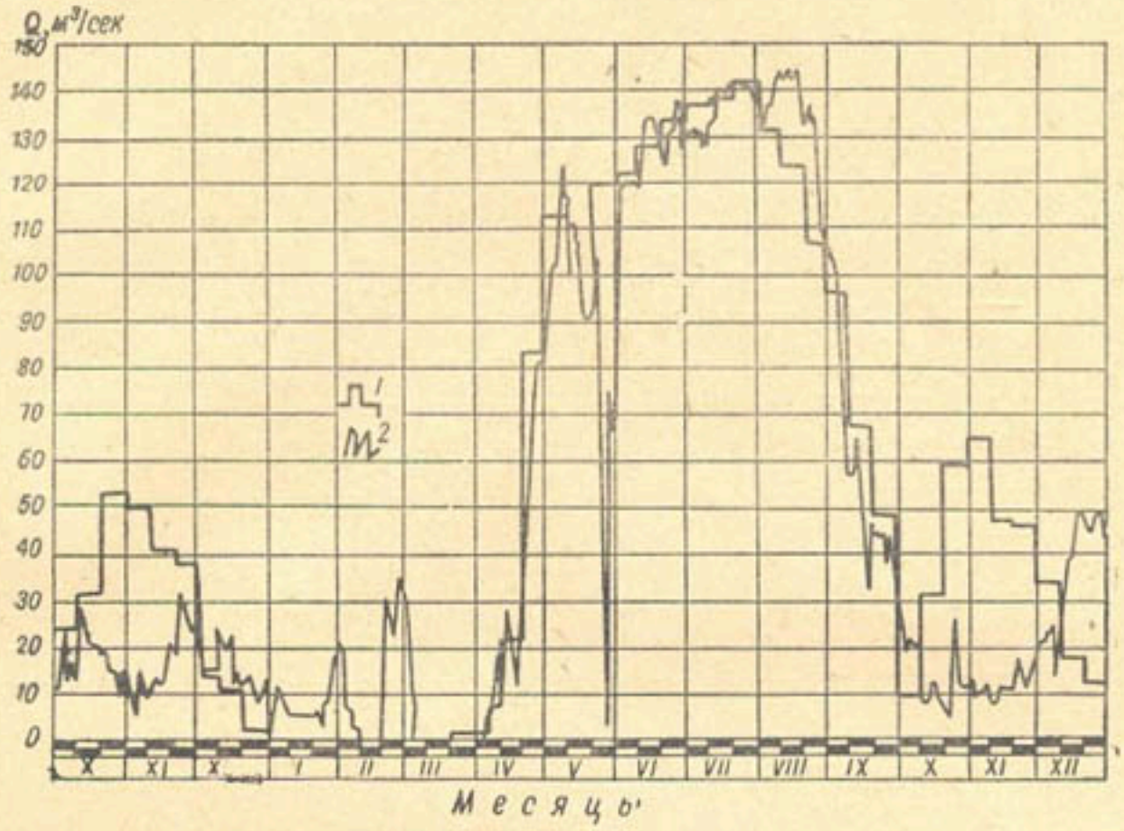


Рис. 2. График водозабора:
1 — плановый; *2* — фактический.

Каналов, управляемых самостоятельно, немного (БФК, Кировский канал, Зах и др.).

При разработке рекомендаций по автоматизации водораспределения необходимо различать каналы полностью водообеспеченные с гарантированным водозабором и водонеобеспеченные каналы, а также учитывать влияние уклона канала.

АВТОМАТИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Средства автоматики и телемеханики, пригодные для применения на оросительных каналах, разделены нами на водомерные сооружения с приборами, телеизмерительные системы, телеизмерительные устройства, комплексные телемеханические устройства и гидравлические затворы. В таблицах, приведенных ниже, даны технические характеристики, область применения, достоинства и недостатки их.

При классификации водомерных сооружений и приборов мы приняли во внимание то обстоятельство, что для каждого регулирующего гидротехнического сооружения или гидропоста имеются свои расходные формулы с одним-тремя переменными параметрами. Посты, оборудованные водомерными сооружениями, позволяют сократить число переменных параметров до одного, следовательно, на них измерением одного переменного параметра можно определить расход

Таблица 2

Характеристика водомерных сооружений

Водомерные сооружения, допускающие применение средств автоматизации и телемеханизации	Техническая характеристика	Технические требования									Область применения	Недостатки
		простота	надежность	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	диапазон колебаний горизонта		режим нижнего бьефа		примененный водомерный прибор		
						до 1 *м*	до нескольких метров	затопленный	незатопленный			
Водомерное русло (тарированное) рекомендуется на крупных каналах	Избранный участок канала должен быть с устойчивым поперечным сечением, неразмываемым и незаиляемым, прямолинейным с равномерным движением струй, отсутствием напора или спада (желательно участок канала облицевать)	+	+	—	+	+	+			Рейка, лимнограф, расходографы или другие поплавковые приборы	На речных или балансовых гидропостах канала, где не имеется водомерного сооружения	Ограниченность применения
Водосливы Чипполети, пропорциональный Иванова, треугольный и др.	$Q \geqslant 3$ *м*³/*сек*, $Z > 10$ *см*, $m = 1:1$ или $1:2$, $Q = 1{,}86\ bH^{3/2}$	+	+	—	+	+	—	+	+	То же	На гидропостах канала с $Z = 10$ *см*	Потеря напора
Водомерный порог	$Q = f\ (H)$; применяется при незатопленном и затопленном истечении, $h/H = 0{,}82$	+	+	—	+	+	—	+	+	То же	То же	
Водомерные лотки	Состоят из входной части, узкой горловины и выходной расходящейся части $Q = f\ (H)$, где H берется по рейке, находящейся в конце первой трети длины входной части. При затопленном истечении ($h/H > 0{,}7$) вводится поправка	+	+	—	+	+	—	—	+	То же	То же	Сравнительная сложность конструкции

Трубчатые водомеры САНИИРИ (с насадком, кольцом, приставкой и др.)	$Q < 1{,}5$ *м³/сек*; используются стандартные асбоцементные трубы Д-368; 456; 546; 600; 800; 1000; 1250; 1500 *мм*; Длина труб $L < 6-2Д$. Эти водомеры имеют следующие модификации: 1) с насадком ($l_{нас} = 2-3\, d_{нас}$; $Д = 1{,}9 + 1{,}5$ *м*; $\frac{d}{D} = 0{,}74$; $Q = 3{,}9 d^2 \sqrt{z}$); 2) с кольцом; 3) с различными сопротивлениями; 4) приставки к существующим трубчатым сооружениям	+	+	+	+	+	−	+	+	Расходоуказатель и счетчик стока САНИИРИ ДРС-М и СВН-58	На водовыпусках с расходом $< 1{,}5$ *м³/сек*	—
Парциальный водомер Пикалова — Поповой	Параллельно с гидросооружением строится сооружение со счетчиком „Космос"	—	+	—	—	+	+	+	+	Счетчик „Космос"	На гидропостах, расположенных на участках канала, проходящих в насыпи или в полувыемке и полунасыпи	Сравнительная сложность и неэкономичность
Тарированные сооружения	Любое гидротехническое сооружение, пропускающее расход воды канала (перепад, быстроток, регулятор), можно использовать как водомерное сооружение, предварительно протарировав его. При этом расход определяется по формуле $Q = m\omega \sqrt{2gz}$	+	+	+	+	+	+	+	+	Все приборы, пригодные для открытых гидропостов	На перепадах, быстротоках, головных сооружениях водопусков, водосливах и т. д.	Сравнительная сложность тарировки

Таблица 3

Характеристика водомерных приборов

Приборы	Техническая характеристика	Возможность передачи показаний прибора на расстоянии	Технические требования						Область применения	Недостатки
			простота	надежность	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	возможные пределы измерения, м			
							<1	>1		
Приборы, измеряющие горизонт H Все виды уровнемеров, показывающие горизонт: поплавковые, пьезометрические, электродные с омическим сопротивлением, с упругими чувствительными элементами, пьезокварцевыми или с угольными чувствительными элементами, пневматические, плунжерные и др.	Эти водомеры относятся к наиболее простым типам. Расход определяется по формуле $Q = f(H)$. В настоящее время наибольшее распространение получили поплавковые уровнемеры	Возможно	+	+	+	+	+	+	На открытых гидропостах	Необходимость дополнительных операций для определения расхода
Лимнографы — непрерывно регистрирующие горизонт	Известно несколько конструкций лимнографов с вертикальным барабаном (Фюсса, Отт); наибольшее распространение получили лимнографы с горизонтальным барабаном (Альбректа фирмы Отт). Имеется часовой механизм, вращающий барабан, обернутый бумагой. Карандаш или перо, закрепленные на барабане, следят за ходом поплавка и чертят лимниграмму	Нет	—	+	+	+	+	+	То же	Сравнительная сложность и дороговизна; невозможность передачи показаний на расстояние

Расходографы	Расходограф отличается от лимнографа тем, что сразу регистрирует расход; это достигается при помощи улитки, находящейся на оси барабана, которая очерчена по уравнению $y = kx^{3/2}$ индивидуально для каждого гидропоста	Нет	—	+	+	+	+	+	То же	То же
Приборы, измеряющие напор (z) Динамический расходоуказатель САНИИРИ ДРС-М	Чувствительный орган — свободно подвешенный на гибкой тяге к пружине поршень, воспринимающий перепад давления z. Устанавливается в трубчатых сооружениях, работающих под напором. Стрелка указывающего прибора показывает расход. Циферблат указывающего прибора градуируется индивидуально для каждого сооружения по формуле $Q = m\omega\sqrt{2gz}$	Возможно, датчик частотный или индуктивный	+	+	+	+	+	+	На трубчатых водомерных сооружениях	—
Дифференциальный водомер Глубышева	Представляет собой две трубы с поплавками, подвешенными на тросах, перекинутых через шкивы, которые через зубчатую передачу соединены с указывающим расход прибором. Циферблат прибора градуируется индивидуально для каждого сооружения	Довольно сложно	—	+	—	+	+	—	То же	Сравнительная сложность и неэкономичность
Приборы, измеряющие скорость (v) Вертушечные водомеры-счетчики (на открытых гидропостах при больших расходах)	Вертушка-турбинка на вертикальной оси опускается в поток. Вращается под влиянием скорости течения, скорость вращения (число оборотов вертушки особой передачей „n" передается счетчику, который фиксирует число оборотов вертушки. При измерении скорости в различных точках потока определяется средняя скорость. Расход воды находится по формуле $Q = \omega v_{ср}$	То же	—	+	+	—	+	+	На мостиковых и люлечных гидропостах; на крупных каналах и реках	Сложность производства замеров средней скорости

Продолжение табл. 3

Приборы	Техническая характеристика	Возможность передачи показаний прибора на расстоянии	Технические требования						Область применения	Недостатки
			простота	надежность	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	возможные пределы измерения, м			
							<1	>1		
Вертушечные водомеры на трубчатых водовыпусках	В трубу вставляется специальная камера, куда помещается вертушка. Конструкция камеры может быть различной. Принцип действия такой же, как в первом случае, только измерение производится в одной точке непрерывно	Возможно	+	+	+	—	+	—	На трубчатых водомерных сооружениях с $Q=1$ $м^3/сек$	Износ лопастей вертушки; ограниченность применения
Приборы определяющие сток воды ($w=Qt$) Роторный счетчик стока САНИИРИ СВН-58	Чувствительный элемент—свободно подвешенная турбинка на пружинке с подшипником наверху. Устанавливается на водомерных трубчатых сооружениях, работающих под напором. Указывающий прибор проградуирован в расходах и имеет две стрелки. При каждом обороте турбинки стрелки передвигаются, указывая расход и сток воды	Возможно, датчик число-импульсный или частотно-импульсный	+	+	+	+	+	—	То же	—
Счетчик стока конструкции Д. П. Колодкевича	Состоит из шкива, на который намотан гибкий трос с поплавком и противовесом, червячного вала с непрерывной нарезкой, наглухо соединенного со шкивом, подвижной каретки с роликом, конуса с часовым механизмом и циферблата с двумя стрелками, указывающими сток и расход воды. Нарезка вала рассчитывается индивидуально для каждого сооружения	Довольно сложно	—	+	+	+	+	+	На всех открытых гидропостах	Сравнительная сложность и неэкономичность

Объемные водомеры	Имеется большое количество различных конструкций этого типа, но все они рассчитаны на малые расходы. К ним относятся расходомеры: объемные, вентильные и весовые	Возможно, датчик число-импульсный	+	+	+	+	+	—	Для расходов до нескольких десятков метров	Сравнительная дороговизна и ограниченность применения

Таблица 4

Характеристика телеизмерительных систем и электрических датчиков

Системы и принципы их действия	Основные элементы (преобразователи), характеризующие систему	Технические требования к датчикам								Область применения	Недостатки
		простота	надежность	помехоустойчивость	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	дальнодействие, *км*				
							1	10	100		
I. Токовые некомпенсационные системы											
Системы основаны на передаче по линиям связи значений измеряемой величины током, для этого показания первичного измерительного прибора преобразуются в ток или напряжение в той или иной пропорции, которые измеряются на приемной стороне. Обычно применяется постоянный ток, реже — переменный											
1. Выпрямительные (выпускаются заво-	Выпрямителями (датчиками) служат электрон-	+	+	—	+	—	+	+	—	На расстоянии до 7 *км* по воздуш-	Качество линии связи и темпера-

Продолжение табл. 4

Системы и принципы их действия	Основные элементы (преобразователи), характеризующие систему	Технические требования к датчикам								Область применения	Недостатки
		простота	надежность	помехоустойчивость	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	дальнодействие, *км*				
							1	10	100		
дом „Электропульт")	ные лампы (неоновые лампы), полупроводниковые элементы (германиевые и другие триоды), индукционные и другие выпрямители									ным проводам и до 20 *км* по кабельным линиям связи	турные факторы влияют на величину погрешности
2. С преобразователями сопротивления	Наиболее распространены реостатные преобразователи с трущимся и ртутным контактами	+	+	—	+	—	+	+	—	То же	То же
3. Генераторные	Преобразователь — миниатюрный генератор постоянного тока, состоит из индукционного счетчика и магнитно-электрического генератора	+	+	—	+	—	+	+	—	То же	То же
II. Компенсационные токовые системы напряжения Системы отличаются от предыдущих наличием компенсаторов, сравнивающих измеряемую величину с величиной тока в линии связи. В этих системах погрешности, вносимые линией связи, почти полностью устранены. Эти системы делятся на следующие:											

1) основанные на компенсации вращающего момента первичного измерительного механизма;	Компенсаторами могут быть фотоэлементы, электронные лампы и др.	—	+	+	+	+	+	+	—	То же	То же
2) основанные на компенсации угла поворота подвижной части первичного измерительного механизма;											
3) основанные на компенсации скорости вращения подвижной части первичного измерительного механизма;											
4) основанные на компенсации вспомогательного (промежуточного) электрического параметра, зависящего от значений измеряемой величины											
Компенсационными являются и системы напряжения (потенциометрические) постоянного тока. Они обладают высокой чувствительностью	Преобразователи — автоматические компенсаторы-потенциометры	+	—	+	—	+	+	+	—	То же	То же
III. Лагометрические системы токов и напряжения (синхронно-следящие и др.)	Преобразователи — лагометры, сельсины, магнесины и др.	+	+	+	—	+	+	—	—	При дистанционном измерении горизонтов воды и положения затворов на крупных гидроузлах	Многопроводность; необходимость электропитания на приемной и передающей сторонах, неэкономичность

Продолжение табл. 4

Системы и принципы их действия	Основные элементы (преобразователи), характеризующие систему	Технические требования к датчикам								Область применения	Недостатки
		простота	надежность	помехоустойчивость	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	дальнодействие, км				
							1	10	100		
Делятся на следующие группы: 1) токовые лагометрические, 2) мостовые на переменном токе, 3) индукционно-уравновешенные, 4) с автосинами и магнесинами; система трехпроводная		—	—	—	—	—	—	—	—		использования на большие расстояния
IV. Частотно-импульсные системы											
Измеряемая величина преобразуется в частоту импульсов постоянного или переменного тока. Системы имеют ряд преимуществ по сравнению с предыдущими: 1) независимость показаний приемного прибора от изменения параметров линии связи и возможность многократного ис-	Преобразователи — индукционный счетчик электрической энергии, фотоэлектрические и др. Приемным прибором служат различные частотомеры	—	+	+	+	+	+	+	+	На гидропостах с небольшим диапазоном колебания горизонта воды примерно до одного метра	Возможность потери импульсов

пользования линии связи, возможность передачи измеряемой величины по высоковольтным линиям. Дальность действия таких систем теоретически не ограничена. Применяются импульсы низкой частоты не более 14 *гц*		—									
V. Частотные системы переменного тока											
Основаны на передаче значений измеряемой величины переменным током синусоидальной формы. Изменения параметров канала связи не влияют на частоту, и эти системы являются системами дальнего действия. Применяется любой диапазон частот, который характеризуется $\lambda = f_{max}/f_{min}$. Эти системы делятся на две группы: с малым коэффициентом $\lambda = 1{,}1$ и с относительно большим коэффициентом $\lambda = 1{,}5-10$. Системы работают в области подтональных частот (0—300 *гц*) и называются низкочастотными	Преобразователи: 1) индукционный измерительный механизм с прерывателем различной конструкции, например фотоимпульсная система; 2) емкостный преобразователь с электронноламповым генератором (например $R-C$ генератор, выпускаемый заводом „Электропульт"); 3) индуктивные преобразователи, включенные в колебательный контур генератора; 4) преобразователи сопротивления, регулирующие частоту генератора; 5) преобразователи взаимной индуктивности, управляющие частотой электронноламповых генератора. Приемный прибор — частотомер, включающийся в линию через специальные фильтры, повышающие помехоустойчивость системы	—	+	+	+	—	+	+	+	На каналах протяженностью более 15—20 *км*	Помехонеустойчивость по сравнению с числовыми и временными системами

Продолжение табл. 4

Системы и принципы их действия	Основные элементы (преобразователи), характеризующие систему	Технические требования к датчикам								Область применения	Недостатки
		простота	надежность	помехоустойчивость	чувствительность ± 1%	точность ± 3%	дальнодействие, *км*				
							1	10	100		
VI. Системы времени											
Измеряемая величина преобразуется в импульсы переменного или постоянного тока, причем длительность импульсов или интервалов между импульсами зависит от значений измеряемой величины. К этим системам относятся и фазовые системы, где значение измеряемой величины передается углом сдвига между двумя переменными токами. Системы делятся на длиннопериодные (5—50 сек.) и короткопериодные (период составляет десятые доли секунды)	Преобразователи—профилированный диск-цилиндр, контактные преобразователи с электронными лампами, сопротивления (реостаты)—метод динамической компенсации, электромагнитные реле и электроннолампповые реле. Приемным прибором может быть ондулятор, регистрирующий импульсы на ленте, или другой указывающий прибор	+	+	+	+	—	+	+	+	То же	Может отмечаться дополнительная погрешность от непостоянства параметров линии связи
VII. Число-импульсные или кодо-импульсные системы											
Измеряемая величина преобразуется в импульсы или коды, образуемые импульсами различных	Преобразователи—электромагнитные реле, фотореле, мост сопротивления. Приемным прибором	—	+	—	+	+	+	+	+	То же	Сравнительная сложность, особенно при больших количествах сигналов

качеств (полярность, длительность и др.) или импульсами, передаваемыми с различными интервалами (частотой импульсов). Параметры канала связи не влияют на передаваемые число-импульсы, однако возможно исчезновение или появление ложного импульса вследствие помех	служат различные типы интеграторов										

Таблица 5

Характеристика водомерных телеизмерительных устройств

Устройства	Техническая характеристика устройств или прибора	Датчики телеизмерения		Технические требования к устройству							Пределы измерения		Область применения	Недостатки	Тип телеизмерительного устройства (см. табл. 4)
		первичный	вторичный	простота	надежность	чувствительность ±1 %	точность ±3 %	дальность действия	измеряемые параметры H	измеряемые параметры z	$\frac{\gtrless}{\vee}$	$\frac{\gtrless}{\wedge}$			
Поплавковые сельсинные уровнемеры типа ДСУ з-да „Электропульт"	Индукционно-выпрямительная система (сельсины) трехпроводная, выпускается з-дом „Электропульт" в следующих модификациях: для H=2,5; 5,0; 10 *м вод. ст.* Может работать только при наличии отдельных выделенных проводных линий связи с сопротивлением менее 3000 *ом* и сопротивлением изоляции между проводами не ниже 3000 000 *ом*. Питается от сети переменного тока 127 или 220 *в*	ДСУ-1	ВСПИ-1, сельсин типа СС-404	—	+	+	+	До 7 *км* по воздушным линиям и до 20 *км* по кабельным	+	—	—	+	На крупных водозаборных сооружениях	Многопроводность; увеличение погрешности с расстоянием; высокие требования к линиям связи; питание от сети переменного тока	III,4
Поплавковые импульсные уровнемеры типа „Дальнепередатчик" САНИИРИ	Число-импульсная система может работать по двум телефонным проводам. Слаботочная. Качество линии связи не влияет на точность прибора	Поляризованное реле	Нет	+	—	+	+	До 20 *км* и более	+	—	+	—	На гидропостах с колебанием горизонта до 1 *м*	Возможность появления ошибки при нарушении контакта в передающем устройстве	VII

														(потеря импульса) и необходимость посылки на ДП большого количества импульсов для повышения точности	
Поплавковые реостатные и потенциометрические уровнемеры	Реостатные и потенциометрические системы основаны на омическом сопротивлении. Вторичный измерительный прибор — милливольтметр	Реостат или потенциометр	Нет	+	+	+	+	До 25 *км*	+	—	+	—	При устойчивом режиме в каналах с редким изменением горизонта	Погрешность от потери напряжения в линии и истирание (износ) контактов при частых колебаниях горизонта	II,4
Радиоуровнемеры (Бакулина, Манохина, Иванченко и др.)	Состоят из следующих блоков: прибор-водомер, датчик (звуковой генератор), программное устройство	Акустический		+	—	+	+	>100 *км*	+	—	+	+	При отсутствии проводной линии связи	Помехонеустойчивость	—
Электродные уровнемеры Карандеева, Штенгаузена, Вартаньяна и др.	Система электрических контактов. При изменении уровня воды в резервуаре замыкается пара контактов. При этом возникает в цепи сигнал. Число сигналов „*n*" зависит от числа погруженных в воду электродов. Число проводов равно числу электродов. Указывающий прибор-миллиамперметр	Электроды	Нет	+	+	+	+	Местное	+	—	+	—	Для измерения горизонтов без передачи на расстояние	Многопроводность; влияние на точность концентрации солей	I

Устройства	Техническая характеристика устройств или прибора	Датчики телеизмерения		Технические требования к устройству							Пределы измерения		Область применения	Недостатки	Тип телеизмерительного устройства (см. табл. 4)
		первичный	вторичный	простота	надежность	чувствительность ±1 %	точность ±3 %	дальность действия	измеряемые параметры H	измеряемые параметры z	$\frac{м}{м}$	$\frac{м}{м}$			
Уровнемеры манометрические Академии Коммунального хозяйства ДМ-АКХ-3 и дифманометрические ДМ-1	Датчик-манометр с плоской мембраной. Представляет собой индуктивный мост с двумя смежными изменяющимися плечами; одно плечо изменяется в сторону увеличения, другое—в сторону уменьшения индуктивности. В диагональ моста включен вторичный прибор — милливольтметр. Передача осуществляется постоянным током. Выпрямитель переменного тока — купроксовый, собранный по мостовой схеме.	Манометр	—	+	+	—	+	До 5 *км*	+	—	—	+	В трубчатых водовыпусках, работающих под постоянным напором. При колебании горизонтов в пределах: H=1,6; 2,0; 4,0; 6,3 *м*	Применимость только в напорных трубах при H=1,6*м*; сложность схемы	III,3
Уровнемеры с сильфонами (гофрированными коробками)	Состоит из следующих узлов: а) датчика с упругим чувствительным элементом (сильфоном), б) электромагнитного стабилизатора напряжения	Потенциометр		—	+	+	+	До 5 *км*	+	—	+	—	В открытых гидропостах	Сравнительная сложность	II

Роторный счетчик стока САНИИРИ СВН-58	Свободно подвешенная турбинка на пружинке с подшипником наверху. Достоинство — отсутствие часового механизма	1) Число-импульсный; 2) частотно-импульсный	+	+	+	+	< 30 *км*	—	+	+	—	В комплексе с трубчатыми водовыпусками САНИИРИ, работающими под напором		
Время-импульсная короткопериодная система телеизмерения ВСТ-1	Датчик собран на бесконтактных лампах, питается из ДП. Генератор работает на кристаллическом триоде. Колебание генератора с фиксированной частотой в пределах 5000—2000 *гц*, передается через проводную линию на приемное устройство. В приемном устройстве осуществляется измерение интервала времени с момента посылки в линию очередного импульса постоянного тока до момента прихода импульса звукового генератора	Потенциометрический	Время-импульсный	+	+	+	+	< 100 *км*	+	—	+	—	Применяется в комплексе с телемеханическим устройством КСТ-1	Сравнительная сложность	II,4
Телерейка (конструкция В. И. Уса ИЭА АНУзССР)	Выбор объекта — комбинационный, система двухпроводная. Дальность действия до 100 *км*. Число реле выбора —2. Питание ИП—централизованное	Датчик поплавковый		—	—	—	—	< 100 *км*	+	—	+	—	Может применяться только для контроля и сигнализации	То же	—

Техническая характеристика комплексных телемеханических устройств,

Наименование Ту — Тс	Метод кодирования	Обычные (общие) требования							
		простота	надежность	помехоустойчивость	малорелейность	блочность	малопроводность	аварийная сигнализация	использование полупроводников и бесконтактных элементов
ТУИС-56 (конструкторы Д. П. Колодкевич, Г. М. Белинский)	Комбинационно-полярный	+	—	—	—	—	—	+	—
ТУИС-57 (Д. П. Колодкевич, Г. М. Белинский)	.	—	—	—	—	—	—	+	—
ТУИС-58 (Д. П. Колодкевич, А. С. Старковский)	Комбинационно-частотный	—	+	—	—	—	—	+	—
ТРВ-58 (Д. П. Колодкевич, А. С. Старковский)	.	—	+	—	—	—	+	+	—
Ту—Тс ИЭА АН УзССР (установлен на Каттакурганском водохранилище)	.	+	—	—	+	—	—	—	—
Ту—Тс ИЭА АН УзССР (1959 г. В. И. Ус)	.	—	+	+	+	+	+	+	—
Ту—Тс ИЭА АН УзССР (Абдуллаев Д. А.)	.	+	+	+	+	+	+	+	+
КСТ-I-М или ЧСТ-САНИИРИ	.	+	+	+	+	+	+	+	+

воды, чем значительно упрощается автоматизация и телемеханизация учета воды (табл. 2 и 3).

Как видно из табл. 3, не все водомерные приборы могут быть привязаны к телемеханическому устройству.

В условиях оросительных каналов требуется передача измерений и аварийных сигналов на разные расстояния — малые и довольно большие. В табл. 4 и 5 приведены различные телеизмерительные устройства и системы с указанием возможной области их применения.

В связи с быстрыми темпами развития телемеханики за последние годы модернизируемые для оросительных каналов телемеханические устройства из года в год значительно совершенствовались, что можно проследить по табл. 6.

Телемеханические устройства 1956—1959 гг., собранные на релейной аппаратуре, были громоздкими и сложными. Эти недостатки устранены в последних конструкциях, собранных на бесконтактных полупроводниковых элементах.

Над созданием гидравлических затворов и автоматически действующих сооружений уже много лет работают конструкторы и науч-

Таблица 6

предназначенных для оросительных каналов

Специальные требования												
			команды с ДП			сигнализация с ИП						
быстродействие 1—3 мин.	емкость до 100 объектов	дальнодействие 20—50 км	управление	задание авторегулятору	циклический выбор телеизмерения	правильность выбора	исполнение команд	аварийный сигнал	обрыв линии	циклическое телеизмерение	переговорное устройство	телефонный разговор
+	+	+	+	—	—	—	—	—	+	+	—	—
+	+	+	+	—	—	+	+	+	+	+	—	—
+	+	+	+	+	—	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	—	+	+	+	—	+	+	—
+	+	+	+	+	—	—	—	+	—	+	—	—
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

ные работники. В настоящее время имеется довольно большое количество разнообразных затворов-автоматов и сооружений. Однако эти конструкции решались бессистемно и зачастую конструкторами, мало знающими условия их применения, поэтому широкого внедрения они не находили.

В табл. 7 приведены основные типы затворов и сооружений, предназначенных для автоматизации регулирования водозабора. Все они могут быть разделены на следующие пять типов.

I. Постоянства горизонта нижнего бьефа ($h = \text{const}$), т. е. предназначенные для поддержания заданного горизонта в верхнем бьефе.

II. Постоянства расхода ($Q = \text{const}$), предназначенные для поддержания заданного расхода в зависимости от горизонта верхнего бьефа, на сооружениях с незатопленным истечением или напора (Z) в сооружениях с затопленным истечением.

III. Пропорционального водозабора в зависимости от горизонта в старшем канале [$Q = f\ (H)$].

IV. Постоянства горизонта верхнего бьефа ($H = \text{const}$).

Таблица 7

Характеристика автоматически действующих гидротехнических сооружений и гидравлических (вододействующих) затворов

Автоматически действующие сооружения и затворы	Конструкция и принцип действия	Область применения	Режим нижнего бьефа и характеристика параметров	Достоинства	Недостатки
Гидравлические автоматы и затворы на расход $Q < 1$ *м³/сек* = const					
Затвор с вращающимся щитом на горизонтальной оси Бутырина — Кагроманова (САНИИРИ); испытан в лаборатории	Прямоугольный лоток, в котором на горизонтальной оси свободно вращается щит, шарнирно прикрепленный к нижней кромке вертикальной рамы. Отношение плеч щита $l_1/l_2 = 1{,}735$. Поднимая и опуская ось, можно задавать расход. Горизонт воды в нижнем бьефе должен поддерживаться на уровне оси вращения затвора при помощи порога	На открытых водовыпусках	Затопленный $h = \text{const}$	Высокая чувствительность	Необходимость поддерживать горизонт в нижнем бьефе на уровне оси вращения; ось вращения находится в воде
Сифон-автомат Костякова	Сифон подвешивается на тросе, перекинутом через блок, и уравновешивается грузом	В мелких водовыпусках с $Q < 200$ *л/сек*	Затопленный $\omega = \text{const}$	Отсутствие прорези в отсеке канала	Ограниченность применения—может применяться только при тонких стенках канала
Сифон-автомат Курносенкова	К сифону со стороны верхнего бьефа шарнирно прикрепляется небольшой отрезок трубки, от положения которой зависит расход воды	То же	То же	Простота конструкции	Наличие шарнира в воде
Автомат Линдлея	Согнутая труба помещается в колодец. На оголовок трубы надевается колпак с поплавком, закрепленным по кругу. В колпаке имеются отверстия	В водовыпусках с расходом $Q < 0{,}5$ *м³/сек*	Незатопленный $\omega = \text{const}$	То же	Потеря напора

Автомат Бредиса	Качающийся щит Г-образной формы прикреплен шарнирно к выходной части трубчатого водовыпуска. К верхней кромке затвора, находящейся в верхнем бьефе, прикреплен поплавок	В трубчатых водовыпусках с расходом $Q < 0{,}5$ *м³/сек*	То же	То же	Неполный автоматизм: ограниченность угла поворота; большой размер поплавка
Конусообразный поплавок-автомат	В горизонтальном круглом отверстии движется по направляющему вертикальному стержню регулятор-поплавок, состоящий из поплавка и пробки-конуса. Очертание конуса подбирается по расчету	В трубчатых водовыпусках с $Q < 100$ *л/сек*	Затопленный $z = \text{const}$	То же	Сложность и неэкономичность конструкции
Пружинный автомат Бутырина (САНИИРИ); испытан в лаборатории	В прямоугольном отверстии в горизонтальном направлении передвигается поплавок по двум направляющим—*Н*. Поплавок имеет специальное гиперболическое очертание. Движением поплавка управляет пружинка, к которой прикреплена тяга поплавка	В водовыпусках с расходом $Q < 300$ *л/сек*	То же	То же	Ограниченная пропускная способность
Телескопический затвор-автомат Н. А. Алиева (Узгипроводхоз); построен на канале Анхор	В плоском щите водовыпуска делается отверстие и в отверстие шарнирно прикрепляется труба с двумя поплавками. Поплавок полый, через него пропускается вода и этим регулируется погружение трубы	На водовыпусках с $Q < 1$ *м³/сек*	Незатопленный $\omega = \text{const}$	—	Сложность конструкции
Затвор-автомат призма Маковского (КиргАН); испытан в лаборатории	К существующим водовыпускам с плоским затвором прикрепляется полый призматический затвор в нижнем бьефе. Впуском и выпуском воды внутрь затвора поддерживается заданный расход	То же	Затопленный $z = \text{const}$	—	Неэкономичность

Автоматически действующие сооружения и затворы	Конструкция и принцип действия	Область применения	Режим нижнего бьефа и характеристика параметров	Достоинства	Недостатки
Гидравлические затворы на расход $Q < 1 \div 20$ *м³/сек*, $H = \text{const}$					
Затвор Финке; построен на перегораживающих сооружениях Самаркандской области	Плоский щит шарнирно прикрепляется к забральной стенке с согнутой нижней кромкой и уравновешивается грузом, перекинутым через блок. Блок имеет очертание улитки. Весом противовеса задается горизонт в верхнем бьефе. При повышении горизонта затвор поднимается и лишний расход сбрасывает в нижний бьеф. Для увеличения пропускной способности делается колодец в нижнем бьефе	На перегораживающих и сбросных сооружениях	Незатопленный $H=\text{const}$	Простота, надежность. Наносы и плавающие тела беспрепятственно сбрасываются	Истечение должно быть незатопленным
Гидравлический сегментный затвор Мамышева; построен на канале Джун	Сегментный затвор уравновешен противовесом и поплавком, опущенным в колодец, соединенный с верхним бьефом. При повышении горизонта воды в верхнем бьефе затвор приоткрывается и сбрасывает лишнюю воду	То же	То же	—	Наличие гибких тяг и роликов, вносящих погрешность; сравнительная сложность и неэкономичность
Сегментный затвор фирмы Нейрпик типа „АМИЛ"; получил распространение в Алжире	Затвор закреплен на одном конце двухконсольной балки, вращающейся на оси, точка опоры которой находится на бычках. На другом конце консоли имеется противовес. Со стороны верхнего бьефа затвор имеет поплавок. При повы-	То же	То же	Простота конструкции	—

	шении горизонта затвор поднимается и сбрасывает излишний расход				
Гидравлический сегментный затвор Бочкарева—тип I; испытан в лаборатории	Сегментный затвор имеет в верхнем бьефе рычаги-корректоры, которые перемещаются при изменении горизонта	То же	То же	Простота	—
Гидравлический секторный затвор Гипросельэлектро; построен на Шильской и др. ГЭС СССР	Затвор представляет собой сектор-поплавок, вращающийся вокруг оси, закрепленной на пороге водослива. Под затвором находится камера давления	То же	То же	То же	—
Гидравлические затворы на расход $Q=1 \div 20$ *м³/сек* = const					
Гидравлический сегментный затвор Чижа (САНИИРИ); испытан в лаборатории	Сегментный затвор по конструкции напоминает затвор фирмы Нейрпик. Двухконсольная балка опирается на бычки. Со стороны верхнего бьефа консоли закреплен затвор, а со стороны нижнего бьефа — противовес. В верхний бьеф опущен поплавок, подвешенный на гибкой тяге, переброшенной через блок. На другом конце оси закреплена улитка, через которую переброшен трос, прикрепленный к затвору. При подъеме горизонта верхнего бьефа затвор прикрывается и сохраняет заданный расход.	На открытых водовыпусках	То же	То же	Наличие троса и поплавка
Гидравлический сегментный затвор Меркурьева (ВНИИГИМ); испытан в лаборатории	Затвор с верхнего и нижнего бьефов прикреплен к поплавкам, при помощи которых поддерживается заданный напор Z, а, следовательно, заданный расход воды. Этот затвор предназначен для трубчатых водовыпусков, работающих под напором	На трубчатых водовыпусках	Затопленный z = const	—	Громоздкость поплавков

Автоматически действующие сооружения и затворы	Конструкция и принцип действия	Область применения	Режим нижнего бьефа и характеристика параметров	Достоинство	Недостатки
Гидравлический сегментный затвор фирмы Нейрпик типа „АВИС", применяется в Алжире	Этот тип затвора похож на „АМИЛ", но с той разницей, что в нижнем бьефе имеется второй поплавок, прикрепленный к затвору	На водовыпусках для поддержания заданного расхода	Затопленный $z = \text{const}$	Простота конструкции	—
Гидравлический затвор Бочкарева—тип II; испытан в лаборатории	По конструкции похож на тип I	На открытых водовыпусках	Незатопленный $z = \text{const}$	То же	—
Гидравлический затвор шахтного типа итальянского инженера Коглонати	Водозаборное сооружение водовыпуска представляет собой отрезок трубы, вертикально опущенный в воду с крышкой-поплавком. При повышении горизонта воды в старшем канале пропускаемый расход увеличивается, а при понижении—уменьшается	На водовыпусках с разностью горизонтов $> 0{,}5$ *м*	Незатопленный $\omega = \text{const}$		Ограниченность применения из-за необходимости перепада
Гидравлические затворы на расход $O > 20$ *м*³/*сек*, $H = \text{const}$					
Клапанные затворы (плоские или сегментные), построены на сбросных сооружениях Чирчикских и других ГЭС	Устанавливаются на сбросных сооружениях водозаборных плотин Нижняя кромка затвора шарнирно закрепляется на затворе или на пороге, верхняя кромка при помощи троса и противовеса поддерживает заданный угол. При повышении горизонта затвор опускается и пропускает излишки воды, а в зимний период сбрасывает шугу	На сбросных сооружениях	Незатопленный $H = \text{const}$	То же	—

Поплавковый затвор „Призма"	Пустотелый призматический затвор шарнирно закреплен на пороге водослива. Под затвором имеется камера давления. Впуская и выпуская воду в камеру и в затвор, можно задавать поддерживаемый горизонт	На сбросных сооружениях и на водосливной части плотины	То же	—	Неэкономичность
Секторные (барабанные) затворы типа drume-date; получили большое распространение за границей	По принципу действия подобны затворам „Призма". Отличаются очертанием затвора, имеется несколько разновидностей их	То же	То же	—	То же
Гидравлические сегментные затворы; получили распространение на водохранилищных плотинах за границей		То же	То же	—	То же
Крышевидные (клапанные) затворы; получили распространение на водозаборных плотинах за границей	Затвор состоит из двух полотен, образующих водослив плотины— одно полотно перемещается по другому. Под затвором образуется камера давления. Впуская и выпуская воду в камеру, можно регулировать положение затворов.	То же	То же	—	То же
Вальцовые цилиндрические затворы	Затвор — пустотелый цилиндр лежит на наклонной рейке. При помощи тяг подвешен и уравновешен противовесом. При повышении горизонта всплывает и поднимается (шагает) по рейке вверх, а при понижении — опускается	На водосливных и сбросных частях плотин	То же	—	То же
Затвор фирмы Нейрпик типа „АВИО"; применяется в Алжире	Поддерживает заданный горизонт в нижнем бьефе при истечении из отверстия. Может работать при больших напорах. Применяется при регулировании с нижнего бьефа	На водовыпусках с расходом > 30 $м^3/сек$	Затопленное истечение	Простота конструкции	—
Затвор фирмы Нейрпик, смешанного действия	Это затвор „АВИО" со вторым поплавком в верхнем бьефе. При достижении заданных минимальных и максимальных горизонтов верхнего бьефа превращается в затвор H=const	То же	Затопленное h или H = const	То же	—

V. Смешанного действия, т. е. способные перестраиваться и работать, как затворы $h = \text{const}$ и при затопленном истечении, как затворы $H = \text{const}$.

Исследования показали, что некоторое изменение методов проектирования каналов может сильно упростить их автоматизацию и телемеханизацию.

Ниже рассмотрим рекомендации по автоматизации и телемеханизации водораспределения вновь проектируемых и существующих каналов.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИИ ВОДОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Мы рекомендуем четыре схемы водораспределения: „по потребности", „по возможности", „по заявке", „по согласованию". Условия их применения приведены в табл. 8.

Как видно из таблицы, объем телемеханизации для этих схем различен. Схемы, в которых отсутствует телеуправление, проще, а следовательно, и экономичнее.

Во всех случаях телеизмерение осуществляется со всех гидрометрических постов по вызову или циклически, аварийная же сигнализация—со всех слабых участков канала.

Для осуществления водораспределения „по потребности" обязательным являются следующие условия: уклоны канала небольшие ($i < 0{,}0003$); источник орошения может полностью водообеспечить канал, а водозаборное сооружение должно гарантировать в любое время и при любых условиях забор потребного расхода. Перегораживающих сооружений на канале нет. Все головные сооружения каналов оборудованы гидравлическими затворами фирмы Нейрпик типа „АВИО" — постоянства горизонта в нижнем бьефе ($h = \text{const}$) с ограничением верхнего предела расхода. Такими же затворами оборудованы и головные сооружения канала.

Данный принцип водораспределения заключается в том, что хозяйства забирают воду в зависимости от потребности сельхозкультур в воде на данный период по указаниям агронома, а все транспортирующие воду каналы — магистральные и распределительные — обязаны обеспечить потребный расход.

При осуществлении указанного способа водораспределения не требуется телемеханического управления водораспределением и отсутствует необходимость в сбрасывании излишних расходов. Необходимо осуществлять телеконтроль горизонтов воды и обеспечить аварийную сигнализацию с ненадежных участков канала. Емкость канала должна быть рассчитана на суммарный водозабор всех водовыпусков.

При прочих равных условиях на каналах с большими уклонами ($i > 0{,}0003$) вышеуказанный принцип водораспределения не годится, а рекомендуется водораспределение „по заявке". Для обеспечения этого принципа водораспределения все водовыпуски полностью или частично должны быть собраны в узлы с перегораживающими сооружениями.

Перегораживающие сооружения оборудуются гидравлическими затворами фирмы Нейрпик типа „АМИЛ", Финке или другими, поддерживающими заданный горизонт ($H = \text{const}$).

Головные регуляторы водовыпусков, входящих в узел, должны быть водомерными, но необязательно авторегулируемыми.

Таблица 8

Рекомендуемые схемы управления водораспределением при помощи средств автоматики и телемеханики

Способы (принципы) управления водораспределением	Рекомендуемые условия применения	Рекомендуемые средства автоматики и телемеханики			Достоинства	Недостатки
		автоматическое регулирование	телемеханическое управление	телеизмерение и сигнализация		
При проектировании новых каналов						
По потребности	На водообеспеченных каналах с гарантированным водозабором и при небольших уклонах каналов ($i<0{,}0003$)	На головных регуляторах водовыпусков—гидравлические затворы $h=\text{const}$	Не требуется	Телеизмерение горизонтов со всех гидропостов и телесигнализация с опасных участков	Простота и почти полный автоматизм. Отсутствие сбросных и перегораживающих сооружений	—
По заявке	На водообеспеченных каналах с гарантированным водозабором при больших уклонах ($i>0{,}0003$)	На перегораживающих сооружениях—затворы $H=\text{const}$, а на одиночных водовыпусках—затворы $Q=f(H)$. Водовыпуски, входящие в узел, не автоматизируются	Телеуправление задатчиками затворов перегораживающих сооружений	То же	—	Сравнительная сложность
По возможности	На неводообеспеченных каналах при малых уклонах ($i<0{,}0003$)	На головных регуляторах водовыпусков—гидравлические затворы $Q=f(H)$	Не требуется	То же	Простота и почти полный автоматизм. Отсутствие сбросных и перегораживающих сооружений	—
То же	То же при больших уклонах ($i>0{,}0003$)	На перегораживающих сооружениях затворы $H=\text{const}$, а на водовыпусках—$Q=f(H)$	Телеуправление задатчиками затворов перегораживающих сооружений	То же	—	Сравнительная сложность

Продолжение табл. 8

Способы (принципы) управления водораспределением	Рекомендуемые условия применения	Рекомендуемые средства автоматики и телемеханики			Достоинства	Недостатки
		автоматическое регулирование	телемеханическое управление	телеизмерение и сигнализация		
На существующих каналах						
По заявке	На водообеспеченных каналах с гарантированным водозаборам. При любых уклонах	На перегораживающих сооружениях электрические авторегуляторы или гидравлические затворы типа $H = \text{const}$, а на одиночных водовыпусках авторегуляторы $Q = f(H)$	То же	То же	—	То же
Водораспределение по возможности или согласованию	Рекомендуется на неводообеспеченных каналах при слабых уклонах ($i < 0{,}0003$)	На водовыпусках — электрические авторегуляторы $Q = f(H)$	Не требуется	То же	—	То же
То же	При больших уклонах ($i > 0{,}0003$)	На перегораживающих сооружениях — электрические авторегуляторы $H = \text{const}$ с телезадатчиком	Телеуправление задатчиками	То же	—	То же

Одиночные водовыпуски следует оборудовать затворами пропорционального водозабора в зависимости от горизонта воды в старшем канале $[Q = f(H)]$.

При этом принципе водораспределения раз в пять или десять дней диспетчер собирает заявки на воду и корректирует план водопользования. Соответственно измененному плану изменяются уставки задатчиков затворов. Все остальное остается в силе как и для первого случая водораспределения.

Следующий способ — водораспределение „по возможности" — рекомендован для водонеобеспеченных каналов. Этот принцип может быть применен на канале за весь поливной период в целом или частично.

Особенности оснащения канала при больших и малых уклонах приведены в табл. 8, из которой видно, что автоматическая и телемеханическая аппаратура для существующих каналов оказывается сложнее, чем для новых. Кроме того, водораспределение „по потребности" на существующих каналах невозможно, так как они не отвечают необходимым для этого требованиям.

Наиболее подходящий принцип водораспределения на существующих системах — водораспределение „по согласованию", т. е. сложное диспетчерское управление водораспределением. В этом случае часть сооружений канала можно автоматизировать при помощи электрических авторегуляторов, а часть — гидравлическими затворами. При этом телеуправление может быть прямым или через задатчики.

Типы электрических авторегуляторов соответственно должны быть такими же, как и гидравлических затворов, указанных выше.

На рис. *3а* показано одиночное расположение водовыпусков на канале. При такой схеме возможно водораспределение „по потребности" при малых уклонах канала и „по возможности" — так же при малых уклонах (табл. 8).

При компоновке водовыпусков в узлах частично (рис. *3б*) или полностью (рис. *3в*) могут быть применены все остальные принципы водораспределения, приведенные в табл. 8.

Теперь, для сравнения, определим объем телемеханизации для каждого способа водораспределения (рис. 3). Для этого примем следующие обозначения:

А — перегораживающие сооружения;
Б — водовыпуски, входящие в узел;
В — одиночные водовыпуски;
Сг — объекты аварийной сигнализации;
Д — балансовые гидропосты на реке у водозаборного сооружения или на канале;
Г — головное сооружение магистрального канала;
С — сбросные сооружения;
П — плотина;
Т — телеизмерение;
У — телеуправление;
$T_и$ — время, необходимое для телеизмерения со всех гидропостов в два цикла по 3 мин. на объект;
$T_у$ — время, необходимое для телеуправления гидротехническими затворами два раза в сутки по 3 мин. на объект.

Расчеты произведены для участка магистрального канала с девятью водовыпусками (табл. 9).

Как показали расчеты, наибольшая загруженность диспетчера будет при работе по схеме водораспределения „по возможности" на неводообеспеченных каналах с $i > 0{,}0003$.

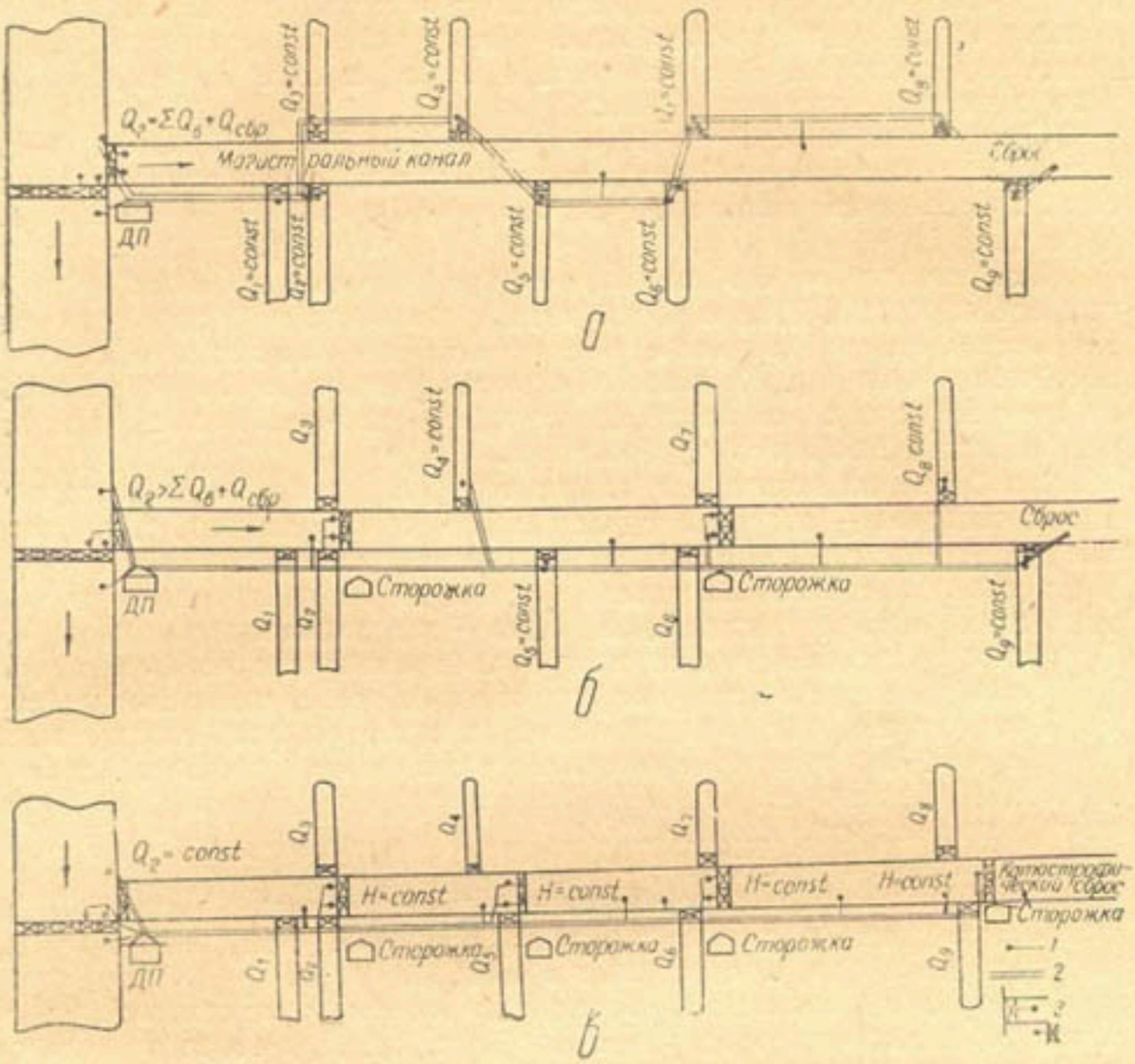


Рис. 3. Варианты компоновки водовыпусков на канале:
1 — водомерные приборы; 2 — линии телефона и телемеханики; 3 — затворы Q=const и H=const.

Во всех схемах сигнализация обо всех отклонениях и ненормальностях должна поступать на ДП без запроса и задержки, независимо от других операций, производимых на линии.

Допускается общий аварийный сигнал по каждому направлению линии телемеханики с последующим определением места и рода аварий путем опроса исполнительных пунктов. Аварийная сигнализация с каждого исполнительного пункта должна работать независимо от одновременно возникших аварий. При этом желательно иметь аварийную сигнализацию, не зависящую от наличия электропитания на ИП.

При телемеханизации каналов к телефонной связи предъявляются следующие требования:

1) телефонная связь должна осуществляться по совмещенному с линией телемеханики каналу связи. На время телефонного разговора действие устройств телемеханики может прерываться, но аварийная сигнализация должна преобладать над телефонным разговором;

2) необходимы возможность вызова диспетчера с исполнительного пункта и двухсторонний вызов для постоянных абонентов связи.

Система телемеханики должна быть рассчитана на работу по двухпроводной стальной воздушной линии ∅ 4 *мм*, удовлетворяющей нормам дальней связи. Необходимо предусмотреть устройство для периодического контроля состояния линии связи с ДП. Должна быть обеспечена передача всех приказов, отправляемых с диспетчерского на исполнительные и всех сообщений с исполнительных пунктов. Приказы диспетчера желательно квитировать. Искаженные или неправильные приказы диспетчера не должны исполняться. При выходе из строя или исчезновении электропитания на одном или нескольких ИП действие устройств телемеханики на остальных пунктах не должно нарушаться.

Таблица 9

Расчеты объема телемеханизации для различных схем водораспределения

Схема водораспределения и характеристика	Объем телемеханизации	Время для операции с ДП
По потребности (канал водообеспечен, $i<0{,}0003$)	$Т = \Sigma В + \Sigma Д = 13$	$Т_и = 1$ час. 18 мин. Всего 1 час. 18 мин.
По заявке (канал водообеспечен, $i>0{,}0003$)	$У = П \times К + Г + \Sigma А + \Sigma В + \Sigma С = 13$ $Т = \Sigma Д + \Sigma А + \Sigma С + \Sigma В = 11$	$Т_у = 1$ час. 18 мин. $Т = 1$ час. 6 мин. Всего 2 часа 24 мин.
По возможности (или по согласованию, канал неводообеспечен, $i<0{,}0003$)	$У = П \times К + Г + \Sigma В + \Sigma С = 15$ $Т = \Sigma В + \Sigma С = 13$	$Т_у = 1$ час. 30 мин. $Т_и = 1$ час. 18 мин. Всего 2 часа 48 мин.
По возможности (канал неводообеспечен, $i>0{,}0003$)	$У = П \times К + Г + \Sigma В + \Sigma А + \Sigma С = 12$ $Т = \Sigma В + \Sigma Д = 13$	$Т_и = 1$ час. 18 мин. Всего 2 часа 30 мин.

Аппаратура устройства телемеханики должна быть помехоустойчивой, работать в полевых условиях в диапазоне температур 20—50° при относительной влажности воздуха до 98 %.

Как было сказано выше, телемеханическое управление существующих каналов получается довольно сложным, так как диспетчеру необходимо производить ряд вычислений для оперативной корректировки плана водопользования. Эта задача может быть упрощена, если применить аналоговые машины для диспетчерского управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красивский С. П. Автоматика на сооружениях гидротехнических станций, М., Госэнергоиздат, 1954.
2. Фремке А. В. Телеизмерение, М., Госэнергоиздат, 1958.
3. Циккерман Л. Я., Ефремов Б. А. Измерение уровней в системах водоснабжения, М., 1954.
4. Авлянова К. А. Автоматизация и телемеханизация оросительных каналов, В сб. „Вопросы гидротехники", вып. 2, Ташкент, АН УзССР, 1961.
5. Авлянова К. А. „Автоматизация учета воды на оросительных каналах", Труды САНИИРИ, № 88, Ташкент, 1957.
6. Авлянова К. А. Управление водораспределением на крупных магистральных оросительных каналах при помощи средств автоматики и телемеханики, Труды САНИИРИ, № 88, Ташкент, 1957.
7. Бутырин М. В. Учет оросительной воды гидротехническими сооружениями, М., Сельхозгиз, 1951.
8. Ярцев В. М. Эксплуатационная гидрометрия, М., Сельхозгиз, 1951.

А. УМАРОВ

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВОДНЫМ БАЛАНСОМ НА МАРГЕЛАНСКОЙ СИСТЕМЕ

Разнообразие природных условий ирригационной сети в пределах отдельных систем вызывает значительные изменения в стуктуре водного баланса и баланса грунтовых вод отдельных частей территории. Резкие различия фильтрации в балансе фильтрационных вод, связанные с характером элементов оросительной системы и условиями, в которых работают эти элементы, требуют тщательного изучения посредством стационарных балансовых исследований количественных значений отдельных слагаемых баланса и их природы.

Объектом изучения[1] была Маргеланская оросительная система, расположенная на юго-восточной части Ферганской долины и вытянутая в долготном направлении.

Маргеланская оросительная система пересекает две природные зоны — предгорную и равнинную.

Ирригационная сеть предгорий отличается сравнительно небольшими поперечными сечениями каналов, большими уклонами (i=0,002—0,008) и скоростями воды, а также большими потерями воды на фильтрацию (20—30%).

Для равнинной зоны характерны относительно большие поперечные сечения каналов, меньшие уклоны (i=0,002—0,0007) и скорости, небольшие потери на фильтрацию (15—20%).

Большое разнообразие типичных для определенных площадей области в целом природных условий отдельных частей Маргеланской системы в пределах Ахунбабаевского района Ферганской области позволили наметить три балансовых участка с различными природными условиями. Эти участки были специально оборудованы для проведения стационарных наблюдений и исследований за водным балансом и потерями в отдельных элементах системы.

Первый участок, «Хумдон», находится в предгорной зоне на галечниковом склоне межадырной депрессии, в месте перехода в сазовую равнину, на землях колхоза им. Сталина. По южной границе проходит магистральный ЮФК, в котором потери на фильтрацию в галечнике составляют 20—35%.

На севере участка наблюдается перелом в рельефе и переход к сазовой зоне; центральная часть участка местами заболочена и дренируется искусственной сетью.

---

[1] Исследования проводили сотрудники Ферганской экспедиции Института водных проблем и гидротехники АН УзССР под руководством канд. техн. наук А. А. Рачинского в 1955—1957 гг.

На площадях хорошо освоенного участка «Хумдон» выращивается хлопчатник, сады, бахчи и люцерна.

Расположенный на землях колхоза им. Шверника второй участок, «Хавасман», характерен для условий сазово-солончаковой равнины и имеет высокую степень хозяйственного освоения.

Таблица 1

Природные и хозяйственные характеристики участков

Балансовый участок	Особенности								
	геоморфологические	геолого-литологические	ирригационно-хозяйственные						
			валовая площадь, *га*	к. з. и.	основная культура	удельная протяженность ирригационной сети, *пог.м/га*			удельная протяженность коллекторно-дренажной сети, *пог. м/га*
						магистральной	распределительной	внутрихозяйственной	
Хумдон	Приподнятая окраина Ферганской котловины. Межконусная депрессия	Делювиальные, пролювиальные и аллювиальные наносы, представленные песками, супесями и легкими суглинками на галечниках и конгломератах	473	0,84	Хлопчатник	7,4	1,5	4,7	6,2
Хавасман	Центральная зона Ферганской котловины, плоско-равнинные участки периферии конуса выноса	Аллювиальные отложения, представленные суглинками и глинами с прослоями супеси и песка, подстилаются песком	580	0,75	„	2,8	8,0	25,0	45,1
Дувана	Центральная зона Ферганской котловины, бугристая равнина	Аллювий представлен слоистыми суглинками с прослоями супеси и песка	390	0,2	„	—	—	23,6	41,0

По южной границе участка в полувыемке и полунасыпи проходит магистральный канал БФК с превышением горизонта воды в канале над поверхностью земли на 1,5—2,0 *м*.

Участок подвержен значительному засолению и в целях поддержания удовлетворительного мелиоративного состояния дренирован сетью открытых коллекторов и дрен.

Участок «Дувана», составляющий часть территории колхоза им. Калинина, характерен для условий солончаковой равнины и находится в стадии начального хозяйственного освоения. Он типичен для районов Центральной Ферганы. Земли его интенсивно засолены; поэтому здесь в связи с их освоением последовательно развивается коллекторно-дренажная сеть. Участок в период наших наблюдений (1956—1957 гг.) орошался водами коллекторной сети, которые путем подпора выводили в сеть оросительных каналов.

Основные природные и хозяйственные характеристики опытных балансовых участков приведены в табл. 1.

Выбранные участки в период с января по июль 1955 г. совместными усилиями работников Ферганской УОС, экспедиции № 2 «Узгипроводхоза» и сотрудников Института водных проблем и гидротехники АН УзССР были снабжены необходимыми водомерами и гидрометрическими постами для учета притока и оттока поверхностных и дренажных вод с территории каждого балансового участка.

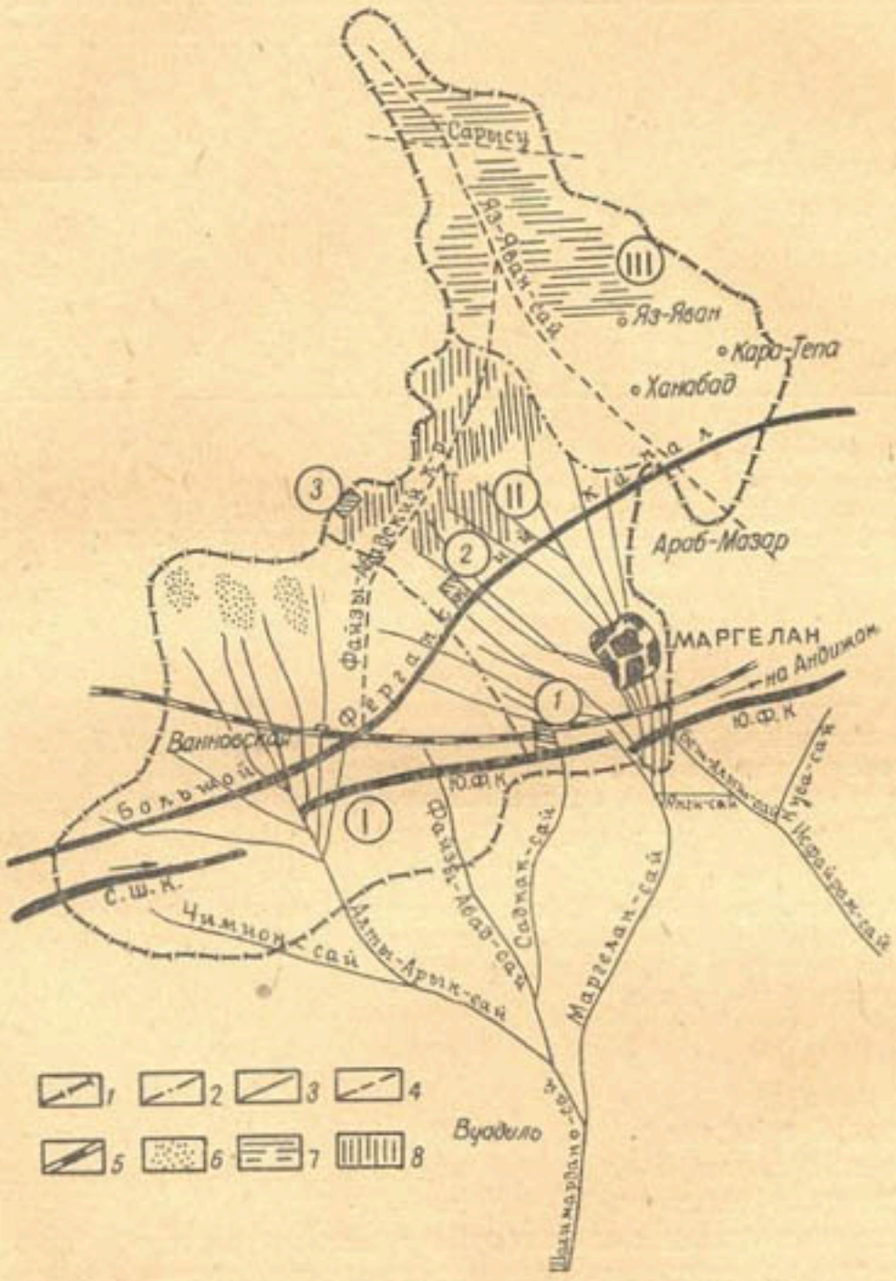


Схема Маргеланской оросительной системы:

а — границы системы; *б* — границы районов; *в* — ирригационная сеть; *г* — коллекторная сеть; *д* — железная дорога; *е* — пески; *ж* — болота; *з* — солончаки. *1* — опытный участок „Хумдон"; *2* — опытный участок „Хавасман"; *3* — опытный участок „Дувана"; I — Алтыарыкский район; II — Ахунбабаевский район; III — Язъяванский район.

Основным типом оборудования гидрометрических постов был водослив А. И. Иванова с бетонной или деревянной рамой. Наиболее крупные гидрометрические створы были оборудованы как реечные посты

с тщательными вертушечными замерами для получения надежной связи

$$Q=f(H)$$

В пределах каждого балансового участка сооружены створы колодцев и шурфов для систематических наблюдений за режимом грунтовых вод. Плановое размещение выбранных участков показано на рисунке.

Таблица 2

Итоговые показатели производительного использования оросительных вод* (период изучения: ноябрь 1955 — ноябрь 1956 гг.)

Балансовый участок	Годовой объем поступления		Отток по верхностных вод за пределы участка	Осталось поверхностных вод в границах участка	Потери на фильтрацию в распределительной и оросительной сети участка	
	поверхностных вод (в т. ч. осадков)	приток подземных вод по коллекторам (в т. ч. фильтрация пограничных каналов)			каналы мелкой распределительной сети	оросительная сеть, включая временный ороситель
Хумдон	7550	21000	500	7050 100	2550 36	2000 28,5
Хавасман	19600	14500	3600	16000 100	3500 22	4500 28
Дувана	1000	20500	0	1000 100	—	500 50

Балансовый участок	Подано на поля для поливов (в поле и мельчайшую оросительную сеть)	Итого приток на участке	Расход на испарение и транспирацию	Отведено коллекторно-дренажной сетью	Отток по толще водопроницаемых слоев	Излишки годовых запасов воды на участке
Хумдон	2500 35,5	28050 100	5500 20	12800 45	8750 35	0
Хавасман	8000	30500	6700	20000** 5500	3800	0
Дувана	50 500	100 6000	42 5000	34 15500 0	24 1000	0
	50	100	83	0	17	

* Значения, относящиеся к первой строке каждого участка, приведены в тысячах кубических метров, ко второй строке — в процентах.

** Цифры в числителе — показатели расхода с учетом транзитного притока, в знаменателе—данные о количестве грунтовых вод, фактически отведенных с участка.

Наблюдения были начаты с октября 1955 г. и продолжались два года. Чтобы охарактеризовать климатические показатели (осадки, испарение, температурный режим и т. п.), мы использовали данные Ферганской метеорологической станции.

Для участка «Хавасман» привлечены материалы по определению почвенного испарения «методом теплового баланса», полученные в результате систематических наблюдений в период с мая по сентябрь месяцы 1956 г. климатологическим отрядом Института географии АН СССР под руководством А. И. Будаговского.

Совокупное использование этих материалов позволило произвести расчеты водного баланса для каждого участка (табл. 2).

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. На орошаемые поля опытных участков поступило 35—50% от суммы поступлений поверхностных вод.

2. Для участка «Хумдон» в формировании приходных статей баланса огромное значение имеют фильтрационные потери каналов распределительной сети, составляющие более 65% поверхностных поступлений.

Регулирование запасов грунтовых вод осуществляется коллекторно-дренажной сетью, отводящей 12800 тыс. $м^3$ вод, т. е. 45% от всех поступлений, и естественной дренированностью территории, при которой отток по галечникам составляет 9750 тыс. $м^3$, или 35%.

В условиях созданной дренажной сети (6,2 *пог. м/га*) происходит относительное равновесие приходно-расходных факторов.

3. Для участка «Хавасман» в условиях современного развития дренажной сети (до 45 *пог. м/га*) приход и расход также примерно балансируется. Однако в данном случае баланс осуществляется за счет того, что более 40% поступлений расходуется на испарение и транспирацию. Этим объясняется интенсивное восстановление к осени запасов солей в верхних горизонтах почвенного слоя и необходимость ежегодных промывок их. Естественный отток грунтовых вод здесь составляет 24% от суммарного притока. Потери воды в распределительно-оросительной сети этого участка достигают 50% от поступления поверхностных вод.

4. Особенность участка «Дувана» на определенной стадии его орошения и освоения состоит в том, что приток по каналам оросительной сети был крайне незначителен (1000 млн. $м^3$). Орошение же обеспечивалось выводом на поверхность минерализованных дренажных вод (плотный остаток от 3 до 12 *г/л*), собранных на вышележащих землях.

Регулирование запасов воды на участке осуществлялось главным образом за счет испарения и транспирации (около 87%). Поэтому рассоление земель находилось лишь в зачаточном состоянии.

В настоящее время начато интенсивное хозяйственное освоение земель, отвод соленых коллекторных вод за пределы участка.

Г. А. АХМЕДОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОТЕРЬ ВОДЫ НА ИСПАРЕНИЕ И ТРАНСПИРАЦИЮ В БАССЕЙНЕ РЕКИ СЫР-ДАРЬИ

Изучение суммарного испарения с поверхности суши и правильное определение его размеров имеет решающее значение при составлении водного баланса орошаемых территорий, проектировании гидротехнических и агромелиоративных мероприятий и регулировании режима влажности почвы. Знание величин испарения и транспирации дикой и культурной растительности необходимо для улучшения гидрологических и агрометеорологических расчетов и прогнозов, изучения водного режима сельскохозяйственных культур, рационального агроклиматического районирования той или другой территории и для других целей.

Особенно важно было определить величины испарения с почвы и транспирации растений за короткие и длительные промежутки времени как при естественном водном режиме почв, так и орошаемом земледелии.

Среди существующих способов определения размеров испарения и транспирации с тех или иных подстилающих поверхностей наиболее надежными являются метод, основанный на градиентных наблюдениях, и метод теплового баланса [2], однако практическое применение этих методов пока ограничено.

В районе бассейна Сыр-Дарьи впервые с 1950 г. начали применять вышеуказанные методы для определения размеров испарения и транспирации в основном с поверхностей, занятых культурной растительностью [3, 5].

Материалы наблюдений обработаны, но их нельзя использовать даже для приближенных расчетов, так как исследования велись в течение короткого периода времени и только по нескольким видам сельскохозяйственных культур. В дальнейшем, когда градиентные наблюдения будут более широко распространены и введены на метеорологических станциях, полученные данные, по-видимому, можно будет использовать для определения испарения и транспирации на территориях бассейнов.

В настоящее время мы вынуждены пользоваться другими методами, точность которых не такая высокая, как при непосредственных наблюдениях.

В данной работе определяли размеры испарения и транспирации методом, рекомендованным Л. В. Дуниным-Барковским [4] и основанным на эмпирической формуле американских исследователей Блейни и Кридла [13,14]. Формула имеет вид

$$U = \sum KF,$$

где U — водопотребление в дюймах;
K — эмпирический коэффициент;

$$F = \frac{t \cdot p}{100};$$

t — среднемесячная температура воздуха по Фаренгейту;
p — количество дневных часов (% от годового), зависящее от географической широты местности (табл. 1).

Таблица 1

Северная широта, градусы	Месяц												За год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
40	6,76	6,73	8,33	8,95	10,02	10,08	10,22	9,54	8,38	7,75	6,72	6,52	100,0
42	6,62	6,65	8,31	9,00	10,14	10,21	10,35	9,62	8,40	7,70	6,62	6,38	100,0

Формула Блейни и Кридла получена в результате наблюдений в различных физико-географических условиях на американском континенте (от экватора до Аляски). Этой формулой пользовались во многих странах мира при водохозяйственных расчетах. Во всех случаях не было никаких существенных расхождений в размерах водопотребления с данными натурных наблюдений [4].

Однако при определении размеров испарения и транспирации по формуле Блейни и Кридла следует иметь в виду, что эта формула дает потенциальный, а не действительный размер испарения — транспирации, наблюдающийся лишь при бесперебойном снабжении растения водой. Это возможно либо на орошаемых площадях, либо на заболоченных землях [4].

Для получения размеров водопотребления (в миллиметрах; по методу Блейни и Кридла) при наличии данных о температуре воздуха можно пользоваться номограммой (рисунок).

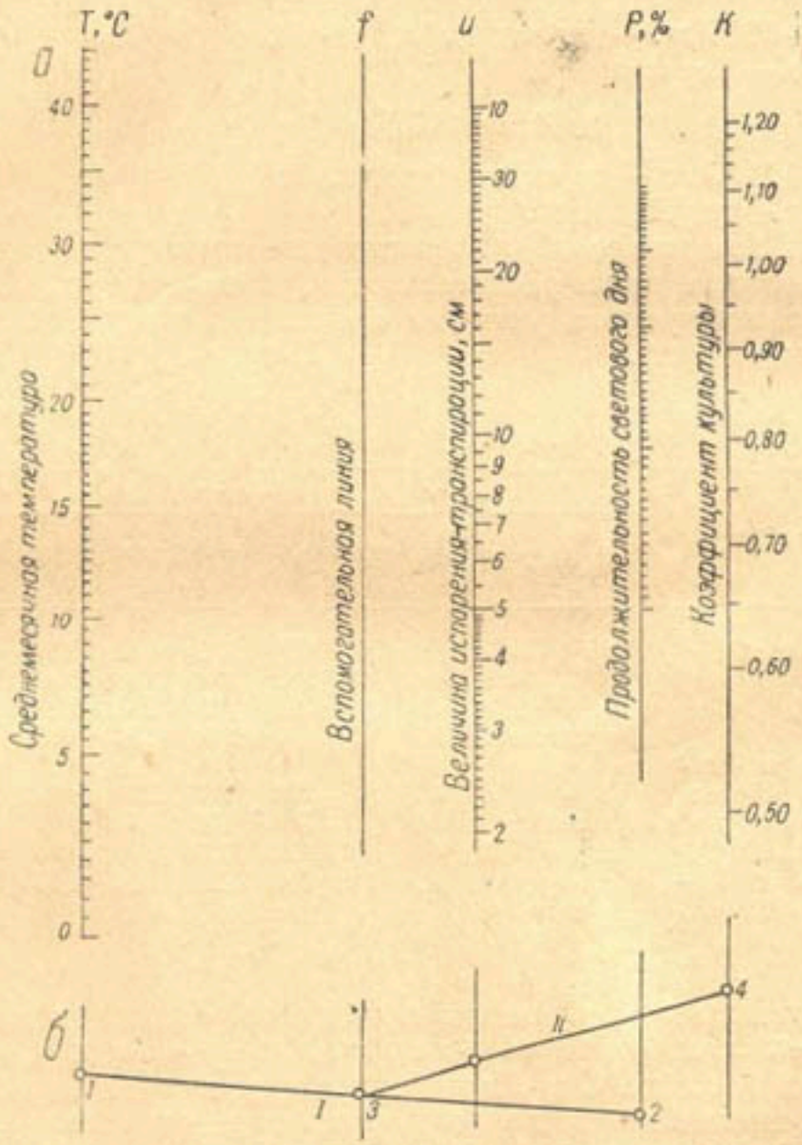
Размер испарения и транспирации, как известно [1], зависит от таких основных факторов как климат, влажность почвы, залегание уровня грунтовых вод и густота растительного покрова, которые необходимо учитывать при определении размеров испарения и транспирации.

Но карты растительного покрова отдельных частей бассейна Сыр-Дарьи не содержали данных, необходимых для учета вышеуказанных факторов. Поэтому мы ограничились подсчетом водопотребления по формуле Блейни и Кридла, объединив растительный покров таким образом:

1) культурные поливные земли (хлопчатник, люцерна); 2) богарные земли; 3) пастбища; 4) заросли камыша и тростника; 5) заросли солянок; 6) туганы; 7) сарсазаны; 8) полынь; 9) эфемеры; 10) каменистые участки и пески без растительного покрова; 11) водные (участки) поверхности.

Эмпирические коэффициенты K в формуле Блейни и Кридла по группам растительного покрова в наших подсчетах следующие:

Вид растительного покрова	K
Хлопчатник	0,60
Люцерна	0,80
Богарные земли	0,75
Солянки	0,90
Туги	1,20
Камыш и тростник	1,10—1,20
Сарсазаны	0,75
Полынь	0,90
Эфемеры	0,90
Пастбища	0,70
Каменистые участки и пески без растительного покрова	0,20
Водные (участки) поверхности	1,00



Номограмма для определения потребления воды культурами (*а*) и схема пользования ею (*б*).

Количество дневных часов за месяц (% от годового) в районе бассейна Сыр-Дарьи дано в табл. 1.

Размеры испарения и транспирации определяли по треугольникам, начертанным на карте растительности. В качестве вершин треугольников приняты метеорологические станции и гидрологические посты. Тем-

пература воздуха у каждого треугольника определена как среднее между наблюдениями метеорологических станций, находящихся в вершинах треугольника.

Суммарное испарение по отдельным участкам бассейна Сыр-Дарьи подсчитывали по периодам.

1. Ферганская долина

а) 1925—1939 гг.— период, предшествовавший широкому развитию орошения;
б) 1940—1955 гг. — период массового освоения орошаемых земель;
в) 1925—1955 гг.— период наблюдений;
г) 1970 г.— перспектива.

2. Голодная степь и Чирчик — Ангрен — Келес

а) 1925—1955 гг. — период наблюдений;
б) 1970 г.— перспектива.

3. Бассейн Сыр-Дарьи

а) 1925—1955 гг.— период наблюдений;
б) 1970 г.— перспектива.

Площади, занятые различной растительностью, устанавливали путем планиметрирования карт растительности, а перспективный размер — при учете проектируемого развития орошаемых площадей (Средазгипроводхлопок, 1952 г.).

Таблица 2

Район бассейна	Месяц									За год
	Периоды	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Ферганская долина	1925—1939	55	70	121	132	137	123	93	55	786
	1940—1955	41	60	122	134	133	118	90	42	740
($F = 20600$ км²)	1925—1955	48	65	122	133	135	121	91	48	763
	Перспектива	35	51	121	134	133	119	91	37	721
Голодная степь и Чирчик—Ангрен—Келес	1925—1955	35	50	104	117	105	92	70	30	603
($F = 23620$ км²)	Перспектива	16	23	106	118	116	102	78	14	573
Ферганская долина, Голодная степь и Чирчик—Ангрен—Келес	1925—1955	41	57	112	124	119	106	80	39	678
	Перспектива	25	36	113	126	124	110	84	25	643

Предварительные результаты подсчета размеров (в миллиметрах) испарения — транспирации за вегетационный период по рассматриваемым районам бассейна Сыр-Дарьи приведены в табл. 2, из которой видно, что перспективные размеры испарения — транспирации уменьшаются приблизительно на 4—5%, так как по формуле Блейни и Кридла пастбища и дикая невлаголюбивая растительность испаряют больше, чем хлопчатник; дикая же растительность испаряет в среднем столько, сколько люцерна. В табл. 3 приведены величины испарения — транспирации по отдельным видам растительного покрова, подсчитанные по формуле Блейни и Кридла, в миллиметрах за вегетационный период.

Из приведенных результатов подсчета величины испарения— транспирации следует, что применение эмпирической формулы Блейни и Кридла без поправок на густоту растительного покрова, испарение за невегетационный период, глубину залегания уровня грунтовых вод и

т. п. неизбежно даст уменьшение размеров испарения — транспирации и тем самым увеличит сток при развитии орошения в любых условиях.

Следовательно, применение способа Блейни и Кридла в условиях Средней Азии без соответствующих поправок недопустимо.

Для получения более достоверных данных о размерах испарения и транспирации нами был собран материал по испарению и транспирации различных растительных покровов, полученный советскими исследователями непосредственно в пределах рассматриваемого бассейна [1, 7, 9, 10, 11, 12], и затем сопоставлен с результатами подсчета по эмпирической формуле Блейни и Кридла.

Таблица 3

Район бассейна	Вид растительного покрова									
	хлопчатник (V—X)	люцерна (III—X)	богара (III—VI)	разнотравье, сарсазаны (III—X)	тростник, камыши и туган (III—X)	водные участки (III—X)	кустарники, лиственные насаждения (III—X)	пастбища (III—X)	полынь, солянки и эфемеры (III—X)	каменистые участки без растительного покрова (III—X)
Ферганская долина	560	1020	456	940	1540	1260	1025	888	1140	250
Голодная степь и Чирчик—Ангрен—Келес	550	1000	450	910	1500	1265	950	886	1050	248

Растительный покров мы классифицировали по следующим группам:

1) хлопчатник } орошаемые земли;
2) люцерна }
3) богарные земли;
4) дикая влаголюбивая растительность (камыш, тростник, туган, и т. д.) и рис;
5) дикая невлаголюбивая растительность (разнотравье, сарсазаны, полынь, солянки, эфемеры, кустарники, каменистые участки без растительности, пастбища и т. д.);
6) водные участки.

Подсчеты и сопоставления размеров испарения — транспирации мы производили по этим шести группам.

Сопоставляя размеры испарения — транспирации, найденные по формуле Блейни и Кридла, с данными советских авторов, мы установили, что величина испарения — транспирации культурной растительности за вегетационный период на 30—40% занижена по сравнению с данными советских авторов; величина же суммарного испарения (в миллиметрах) с дикой невлаголюбивой растительности, за счет которой в настоящее время в основном и идет развитие перспективного орошения,— почти вдвое завышена.

Из табл. 4 следует, что величины испарения — транспирации по формуле Блейни и Кридла значительно отличаются от натурных данных советских авторов.

Исходя из проведенного сопоставления в дальнейшем, при подсчете потерь воды на испарение — траспирацию, мы использовали данные советских авторов. Чтобы сток реки при замене дикой растительности

культурной не уменьшился, взяли нижний предел испарения — транспирации для культурной растительности, верхний — для дикой влаголюбивой и водной поверхности (табл. 4).

При подсчете суммарного испарения с дикой невлаголюбивой растительности был принят коэффициент полноты стояния, по данным И. А. Ильина [6] равный 0,4. К величине испарения — транспирации за вегетационный период [8] добавили величину зимнего испарения в первом приближении в размере выпадавших в то время атмосферных осадков.

Таблица 4

Метод определения	Вид растительного покрова					
	хлопчатник	люцерна	богарные земли	дикая растительность		водные участки
				невлаголюбивая	влаголюбивая	
По формуле Блейни и Кридла	555	1010	453	980	1520	1262
По данным М. М. Крылова, А. М. Альпатьева, С. Н. Рыжова, В. Г. Тихонова, М. М. Рогова, И. С. Седова и др.	630—930	1000—1600	450—550	450—600	1300—1600	1200—1400
Принято нами	700	1100	500	520	1600	1400

Результаты пересчета размеров испарения — транспирации бассейна Сыр-Дарьи выше Чардаринского водохранилища по отдельным районам, а также отдельным видам растительного покрова и водной поверхности со всеми введенными поправками (в миллиметрах) приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5

Район бассейна	Период	Месяц												За год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Ферганская долина ($F = 20600$ *км*²)	1925—1955	21	23	38	46	74	106	138	114	68	33	25	20	706
	Перспектива	21	23	39	48	78	122	164	136	80	34	25	20	790
Голодная степь и Чирчик—Ангрен—Келес ($F = 23020$ *км*²)	1925—1955	38	37	44	56	67	86	90	78	53	36	34	37	656
	Перспектива	38	37	52	72	91	109	128	110	70	50	34	37	828
Всего (F=43620 *км*²)	1925—1955	30	30	40	50	72	100	117	96	54	32	30	29	680
	Перспектива	30	30	45	58	85	116	147	123	76	42	30	29	811

Из табл. 5 видно, что подсчеты размеров испарения — транспирации с введением поправок на испарение за невегетационный период и на густоту стояния дикой невлаголюбивой растительности оказались совершенно противоположными данным табл. 2. Вместо уменьшения размеры испарения — транспирации в перспективе увеличились на 131 *мм* (табл. 6), или 181 *м*³/*сек*.

Таким образом, даже при таком сравнительно приближенном подсчете величина испарения — транспирации в перспективе увеличивается, что приводит к уменьшению стока реки в будущем.

В табл. 6 даны размеры испарения — транспирации по принятым нами видам растительного покрова в миллиметрах за существующий и перспективный периоды. Годовая величина потерь на испарение — транспирацию в табл. 6 распределена по месяцам по формуле Блейни и Кридла, при этом немногочисленные данные советских авторов,

Таблица 6

Вид растительного покрова	Площадь, $км^2$	Месяц												За год
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
		Настоящий период												
Хлопчатник	11174	30	30	46	35	50	130	222	180	100	18	30	29	900
Люцерна	1538	30	30	44	69	154	219	239	199	94	63	30	29	1200
Богара	4141	30	30	66	100	133	154	5	3	2	18	30	29	600
Дикая влаголюбивая растительность и рис	1088	30	30	111	158	215	237	249	219	166	126	30	29	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	25453	30	30	31	42	59	63	72	61	39	34	30	29	520
Водные участки	226	30	42	53	88	245	214	256	231	151	111	50	29	1400
Итого	43620	30	30	40	50	72	100	117	96	54	32	30	29	680
		Перспективный период												
Хлопчатник	20069	30	30	46	35	50	130	222	180	100	18	30	29	900
Люцерна	3133	30	30	44	69	154	219	239	199	94	63	30	29	1200
Богара	2358	30	30	66	100	133	154	5	3	2	18	30	29	600
Дикая влаголюбивая растительность и рис	708	30	30	111	158	215	237	249	219	166	126	30	29	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	15785	30	30	31	42	59	63	72	61	39	34	30	29	520
Водные участки	1567	30	42	53	88	145	214	256	231	151	111	50	29	1400
Итого	43620	30	30	45	58	85	116	147	123	76	42	30	29	811

имеющиеся в нашем распоряжении, подтверждают принятое нами внутригодовое распределение. Из-за отсутствия натурных данных по испарению и транспирации с площади Голодной степи мы решили исключить Голодную степь из расчетной территории бассейна р. Сыр-Дарья, учитывая при этом, что в перспективе все забираемые воды на орошение будут полностью теряться на испарение — транспирацию. Это предположение в какой-то мере не соответствует действительности, так как небольшая часть воды (которой можно пренебречь), забранная в Голодную степь на пополнение грунтовых вод, через некоторое время может вернуться в Сыр-Дарью.

В расчетную территорию бассейна Сыр-Дарьи вошли Ферганская долина и Чирчик-Ангрен-Келесский бассейн общей площадью в 29690 $км^2$.

Подсчеты размеров испарения — транспирации (за 1925—1955 гг.) по отдельным районам указанной территории бассейна Сыр-Дарьи и отдельным видам растительного покрова (в миллиметрах) сведены в табл. 7.

В табл. 8 приведены размеры испарения — транспирации (в миллиметрах) за перспективный период по отдельным районам и видам растительного покрова бассейна Сыр-Дарьи.

Из приведенных результатов подсчета размеров испарения — транспирации со всего бассейна за существующий и перспективные периоды следует, что суммарное испарение в перспективе увеличивается на

Таблица 7

Вид растительного покрова	Площадь, *км²*	Месяц I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
	Ферганская долина (1925—1955 гг.)													
Хлопчатник	6670	21	23	34	24	58	138	240	193	108	16	25	20	900
Люцерна	815	21	23	47	73	158	223	243	203	98	66	25	20	1200
Богара	980	21	23	71	108	141	161	8	4	2	16	25	20	600
Дикая влаголюбивая растительность	573	21	23	114	162	219	241	253	223	170	129	25	20	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	11446	21	23	34	46	63	67	76	65	43	37	25	20	520
Водные участки	116	21	33	58	93	151	220	262	235	156	116	35	20	1400
Итого	20600	21	23	38	46	74	106	138	114	68	33	25	20	706
	Чирчик-Ангрен-Келесский бассейн (1925—1955 гг.)													
Хлопчатник	2979	43	41	64	50	58	106	200	150	90	22	39	37	900
Люцерна	534	43	41	46	63	148	213	232	193	87	58	39	37	1200
Богара	1646	43	41	55	90	125	140	3	2	3	22	39	37	600
Дикая влаголюбивая растительность	147	43	41	106	152	210	232	244	214	161	121	39	37	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	3784	43	41	42	44	45	48	52	47	42	40	39	37	520
Водные участки	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0
Итого	9090	43	41	53	58	73	97	106	85	56	34	39	37	722
	Ферганская долина и Чирчик-Ангрен-Келесский бассейн (1925—1955 гг.)													
Хлопчатник	9640	28	29	43	32	58	128	228	180	102	18	29	25	900
Люцерна	1349	28	29	45	70	155	220	240	200	95	64	29	25	1200
Богара	2626	28	29	68	102	135	155	6	3	2	18	29	25	600
Дикая влаголюбивая растительность	720	28	29	112	159	216	238	250	220	167	127	29	25	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	15230	28	29	35	46	58	62	70	60	41	37	29	25	520
Водные участки	116	28	39	53	88	145	214	256	231	151	111	57	27	1400
Итого	29690	28	29	42	50	73	104	129	105	65	33	29	25	712

131 *мм* или 181 *м³/сек* (табл. 5), а при подсчете без Голодной степи — на 110 *мм*, или 103 *м³/сек*, что свидетельствует об уменьшении стока Сыр-Дарьи в перспективе на те же величины.

С целью более точного подсчета размеров испарения и транспирации необходимо развивать полевые исследования для накопления большого количества натурных данных по испарению и транспирации.

Таблица 8

Вид растительного покрова	Площадь, км²	Месяц I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
	Ферганская долина													
Хлопчатник	8850	21	23	34	24	58	138	240	193	108	16	25	20	900
Люцерна	1705	21	23	47	73	158	223	243	203	98	66	25	20	1200
Богара	980	21	23	71	108	141	161	8	4	2	16	25	20	600
Дикая влаголюбивая растительность	398	21	23	114	162	219	241	253	223	170	129	25	20	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	8053	21	23	34	46	63	67	76	65	43	37	25	20	520
Водные участки	614	21	33	58	93	151	220	262	235	156	116	35	20	1400
Итого	20600	21	23	39	45	79	122	166	136	80	34	25	20	790
	Чирчик-Ангрен-Келесский бассейн													
Хлопчатник	5219	43	41	64	50	58	106	200	150	90	22	39	37	900
Люцерна	1164	43	41	46	63	148	213	232	193	87	58	39	37	1200
Богара	820	43	41	55	90	125	140	3	2	3	22	39	37	600
Дикая влаголюбивая растительность	291	43	41	106	152	210	232	244	214	161	121	39	37	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	1346	43	41	42	44	45	48	52	47	42	40	39	37	520
Водные участки	250	43	48	51	84	142	210	252	228	148	108	49	37	1400
Итого	9090	43	41	58	59	80	120	166	131	78	35	39	37	887
	Ферганская долина и Чирчик—Ангрен—Келесский бассейн													
Хлопчатник	14069	28	29	43	32	58	128	228	180	102	18	29	25	900
Люцерна	2869	28	29	45	70	155	220	240	200	95	64	29	25	1200
Богара	1800	28	29	68	102	135	155	6	3	2	18	29	25	600
Дикая влаголюбивая растительность	689	28	29	112	159	216	238	250	220	167	127	29	25	1600
Дикая невлаголюбивая растительность	9399	28	29	35	46	58	62	70	60	41	37	29	25	520
Водные участки	864	28	39	53	88	145	214	256	231	151	111	57	37	1400
Итого	29690	28	29	45	50	79	122	166	135	80	34	29	25	822

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпатьев А. М. Влагооборот культурных растений, Л., Гидрометеоиздат, 1954.
2. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности, Л., Гидрометеоиздат, 1956.

3. Будаговский А. И. Основные закономерности суммарного испарения. В сб. «Биологические основы орошаемого земледелия», М., АН СССР, 1957.
4. Дунин-Барковский Л. В. Физико-географические основы проектирования оросительных систем, М., Сельхозгиз, 1960.
5. Зуев М. В. Микроклимат хлопкового поля, Л., Гидрометеоиздат, 1956.
6. Ильин И. А. Водные ресурсы Ферганской долины, Л., Гидрометеоиздат, 1959.
7. Крылов М. М. О режиме и балансе грунтовых вод в Голодной степи, Ташкент, 1936.
8. Кузин П. С. Об испарении с поверхности почвы, Труды ГГИ, вып. 7, 1938.
9. Рогов М. М. Гидрология дельты Аму-Дарьи, Л., Гидрометеоиздат, 1957.
10. Рыжов С. Н., Тихонов В. Г. Севообороты, удобрения и поливы хлопчатника, Ташкент, 1949.
11. Соседов И. С. «Изв. АН КазССР», сер. техн. наук, 1958, вып. 1 (13).
12. Шульц В. Л., Орешина Л. М. «Изв. АН УзССР», сер. техн. наук, 1949, №4.
13. Blaney H. F. Consumptive—Use Requirements for Water, A. E., December 1954
14. Griddle W. D. Consumptive—Use of Water on Irrigated Land, PASCE, November 1951, vol. 77.

Х. ЯКУБОВ

КОНСТРУКЦИЯ ПЬЕЗОМЕТРОВ И УСТРАНЕНИЕ НЕДОСТАТКОВ В ИХ РАБОТЕ*

Основным инструментом, с помощью которого производятся гидрогеологические и мелиоративные исследования (фиксируется режим грунтовых и подземных вод и изменение их минерализации во времени), является пьезометр. Поэтому безукоризненная его работа обеспечивает высокую точность исследований; неправильность же показаний снижает, а иногда может совершенно исказить результаты.

Пьезометры должны точно и своевременно передать изменения напора в водоносной толще, в которой они заложены, а для этого необходимо, чтобы их фильтры не закупоривались и не пропускали внутрь мелкие илистые частицы, т. е. имели бы малые выходные сопротивления и обеспечивали надежную работу пьезометров. В связи с этим для обеспечения нормальной работы пьезометров пропускная способность установленных в них фильтров должна совпадать (или быть несколько большей $K_{фильт} = 2{,}0 \div 2{,}5\ K_{грунта}$) с коэффициентом фильтрации грунта, в котором заложен пьезометр. Если это правило не соблюдается, то происходит частичная потеря напора при входе в скважину, а следовательно, понижается точность показаний пьезометра.

Малейшее заиление фильтра и занесение скважин мелкими твердыми частицами увеличивает сопротивления в фильтрах и, следовательно, искажает показания пьезометров.

При решении вопроса о подборе фильтра для пьезометров необходимо учитывать и то обстоятельство, что проникшие в наблюдательные скважины мелкозернистые фракции не извлекаются из них, как это производится в основных эксплуатационных скважинах, где ведется откачка, а осаждаются там. Следовательно, при решении вопроса о подборе фильтра для пьезометров необходимо исходить из условий их работы, т. е. учитывать гранулометрический состав грунта, в котором будут расположены пьезометры.

По литологическим условиям, в которых приходится работать пьезометрам, можно выделить три большие группы водоносных пород: I— мелкоземы — суглинки, супеси, редко глины; II— мелкозернистые пески и гравий с мелкозернистым песком; III— гравий и галечники.

Только в последней группе пород обычные дырчатые пьезометры работают хорошо и не требуют ни особых конструкций фильтров, ни особого ухода.

---

* В статье освещены результаты исследований, проведенных на опытно-производственных системах вертикального дренажа в Голодной степи.

Наибольшее распространение в качестве покровных толщ, содержащих грунтовые воды, имеют мелкоземы. В них приходится обычно устанавливать относительно неглубокие пьезометры глубиной 5—20 *м* (первая группа пьезометров).

В качестве водоносных горизонтов довольно распространены мелкозернистые пески. Установка пьезометров в них — дело достаточно тонкое и сложное (вторая группа пьезометров).

Первая группа — неглубокие пьезометры (5—20 *м* в зависимости от мощности покровного грунта), которые устанавливаются в глинистых и суглинистых грунтах (мелкоземах) для наблюдения изменения уровня и распределения напоров грунтовых вод.

Вторая группа — глубокие пьезометры (20—100 *м* и более); устанавливаются в песчаных и гравелистых грунтах для изучения изменения напора водоносного горизонта.

Неглубокие наблюдательные скважины состоят из трубы $d=3''$, нижняя часть которой на 0,5—2,0 *м* перфорирована круглыми отверстиями $d=10$—12 *мм*, общей скважностью 10—15%; ниже перфорации располагается отстойник глубиной 0,25—0,5 *м*. Конец каркаса пьезометра забивают деревянной пробкой или заваривают плоской железной пластиной. Для предотвращения засорения пьезометра сверху устье трубы должно быть оборудовано крышкой, которая открывается и закрывается торцовым ключом.

Бурение скважин для установки мелких пьезометров производится как ручным способом (змеевиком), так и механическим — при помощи станка УКБ-100. Диаметр этих скважин на 2—4″ больше диаметра фильтровой части пьезометра. Для защиты фильтра от заиления применяются: гравийная засыпка внутрь трубы на 10—15 *см* выше перфорации, войлочная обмотка перфорированной части каркаса, гравийно-сетчатые фильтры, стеклоткань.

Гравийная засыпка внутрь трубы широко используется в практике Голодностепской гидрогеологической экспедицией Узбекского Гидрогеологического треста. Однако почти все пьезометры, установленные в гор. Мирзачуле, были заилены.

Пьезометры с войлочными фильтрами, заложенные на Шурузякском участке и частично в Мирзачуле, показали также невысокие результаты: из 37 кустов заилено 22.

Конструкция фильтров глубоких пьезометров создается двумя способами. По первому способу фильтр изготавливают на поверхности земли, а затем опускают в пробуренную скважину. По второму — гравий засыпают в зазор между стенкой пробуренной скважины и стенкой металлического каркаса, т. е. в затрубное пространство.

Все фильтры глубоких пьезометров, установленных в Мирзачуле (70 штук), изготавливали на поверхности земли.

Для защиты пьезометров от занесения мелким песком применяли гравийно-сетчатый фильтр, состоящий из трубы $d=2^3/_4''$, нижняя часть которой на 2,5—3,0 *м* перфорирована круглыми отверстиями 10—12 *мм*, расположенными на поверхности каркаса в шахматном порядке, с расстояниями между центрами отверстий 20—25 *мм*. Поверхность перфорированной части каркаса обмотана полустальной 2-миллиметровой проволокой с шагом обмотки 20—25 *мм*. Поверх проволочной обмотки, для предотвращения проникновения гравия через отверстия внутрь трубы, наматывается один слой металлической сетки квадратного плетения с размером отверстий 2×2 *мм*. Для предупреждения срыва сетку привязывают к трубе при помощи проволоки, а на нее надевают специально изготовленную из металлической сетки квадратного плетения того

же размера цилиндрическую трубу, диаметр которой на 50—60 *мм* больше диаметра перфорированного каркаса.

В нижней части, около отстойника, цилиндрическую трубу туго привязывают к каркасу при помощи проволоки $d=2$ *мм*. В образовавшийся зазор между каркасом и сеткой засыпают гравий. Засыпку гравия производят постепенно, с постукиванием (для улучшения падения гравия в нижнюю часть) молотком поверх сетки. По мере заполнения этого пространства гравием сетку через 0,5 *м* привязывают проволокой.

По окончании заполнения этого пространства (оно заполнялось на 5—10 *см* выше перфорации) гравием сетку в верхней части привязывали к трубе.

Характеристика гранулометрического состава гравия, использованного в качестве обсыпки в наблюдательных скважинах в Мирзачуле, приводится ниже:

Диаметр частиц, *мм*	Более 10	10—7	7—5	5—3	3—2	2—1	Меньше 1
Содержание фракций, %	6,5	7,32	13,0	31,0	17,7	13,38	10,6

На территории участка вертикального дренажа гор. Мирзачуль, кроме гравийно-сетчатого фильтра, в девяти пьезометрах установлен войлочный фильтр.

Конструкция скважин с войлочным фильтром аналогичная; перфорированная часть каркаса обматывается войлоком. Сверху, для защиты от повреждения при спуске фильтра в скважину, кошму обертывают металлической сеткой, сетку в нескольких местах привязывают проволокой к каркасу.

Готовый фильтр — как гравийно-сетчатый, так и войлочный — устанавливают в скважину впотай к глухой трубе на пеньковом сальнике (рис. 1).

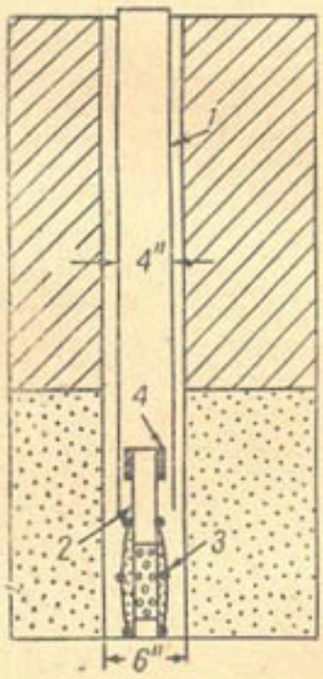


Рис. 1. Установка пьезометра конструкции Узгидрогеолтреста:

1 — глухая часть каркаса; *2* — фильтровой каркас; *3* — гравийно-сетчатый фильтр; *4* — пеньковый сальник.

После установки фильтра все глубокие скважины очищают от шлама при помощи желонки до осветления откачиваемой воды. Этот способ чистки пьезометров и скважин часто применяется экспедицией Узбекского Гидрогеологического треста.

На Шурузякском участке фильтры глубоких пьезометров строили методом засыпки гравия в забой через затрубное пространство (рис. 2). Скважины бурили диаметром 250 *мм* агрегатом УРБ-ЗАМ без крепления стенок глинистым раствором. По окончании бурения скважину обсаживали трубами муфтового соединения $d=147$ *мм*. Каркас имеет однометровый отстойник, выше отстойника он перфорирован на длину 1,5 *м* круглыми отверстиями $d=9$ *мм*; скважность перфорированной части трубы (каркаса) — 10—15%.

В зазор между стенкой ствола скважины и стенкой каркаса засыпают гравий. Ниже приведен гранулометрический состав гравия:

Размер фракций, *мм*	Более 20	20—10	10—7	7—5	5—3	3—2
Содержание фракций, %	24,6	32,7	16,4	8,7	10,6	6,8

Разглинизацию стенок скважин и чистку их от шлама производили с помощью эрлифтной установки, при этом в качестве водоподъемных труб использовали обсадную фильтровую колонку, а в качестве воздуходувных труб — резиновые шланги, опущенные на глубину 20—25 *м*. Откачиваемая вода выливалась прямо вокруг скважины, что недопустимо по условиям сохранения устойчивости устья скважины против размыва. Откачку производили без строгого режима с дебитами выше допустимых (10—20 *л/сек*).

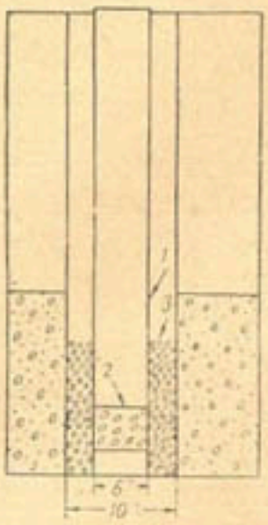


Рис. 2. Установка пьезометра конструкции Узбекского Управления Гидроспецстроя:

1 — глухая часть каркаса; *2* — перфорированная часть каркаса; *3* — гравийная обсыпка.

В результате проверки, произведенной по окончании строительства и в период эксплуатации, выяснилось, что из 70 построенных глубоких пьезометров в Мирзачуле 67 заилились на 3—20 *м* выше фильтра и только 3 пьезометра оказались чистыми. На Шурузякском участке чистыми были 9 пьезометров, а 36 заилились от 3 до 10 *м* выше фильтра.

Основные причины заиления неглубоких пьезометров следующие.

1. При бурении скважин нарушается естественное сложение грунта, в результате чего сильно взмучивается грунтовая вода в скважинах. В эти свежепробуренные скважины, прежде чем осядут мелкие взвешенные частицы, опускают фильтровой каркас, в результате чего илистые частицы проникают в трубу.

2. Несвоевременная засыпка в затрубное пространство мелкого песка или грунта привела к опыливанию стенок скважин, что вызывало проникновение частиц внутрь трубы.

3. Неправильный подбор состава гравия для засыпки внутрь трубы и дефекты в приготовлении войлочного фильтра.

В пьезометрах с засыпкой гравия внутрь трубы мелкие илистые частицы, проникшие в поры обсыпки, оседают и кольматируют фильтр. Кроме того, при описанной конструкции прочистка фильтра невозможна, так как это приведет к разрушению гравийной засыпки. Поэтому в дальнейшем в практике строительства необходимо отказаться от засыпки гравия внутрь трубы, а обсадку фильтра производить через 2—3 часа по окончании бурения скважины — после полного оседания взвешенных частиц.

Заиление глубоких пьезометров происходит в результате следующих причин.

1. Из таблицы гранулометрического состава гравия, использованного в качестве фильтра (как в пьезометрах, заложенных в Мирзачуле, так и в пьезометрах, заложенных в Шурузяке), видно, что преобладающими частицами являются фракции с размерами больше 3 *мм* (70—75%) со средним диаметром 3,5—4 *мм*. Конечно, из гравия подобного состава образуется крупнопористый фильтр, который не в состоянии удержать мелкозернистые пески.

Для пьезометров, установленных в мелко- и среднезернистом песках в составе гравия не должны содержаться частицы крупнее 3 *мм*.

2. В пьезометрах, заложенных в гор. Мирзачуле, в процессе приготовления сальника для свободного опускания фильтра на место пеньковая веревка наматывается толщиной, на несколько миллиметров (5—10 *мм*) меньшей, чем внутренний диаметр глухой обсадной трубы. В ре-

зультате этого сальник неплотно закрывает зазор между фильтровым каркасом и обсадной трубой, а это открывает путь для проникновения мелких песчаных частиц в скважину выше фильтра. Г. Э. Айропетян [1] объясняет аналогичные явления также проникновением мелких частиц через пеньковый сальник. Поэтому в дальнейшем, по возможности, нужно избегать посадки фильтра впотай в глухой трубе через сальник.

3. Применение желонки для прочистки скважин от шлама создает значительную разницу — 6—7 *м* и более — уровня грунтовых вод в скважине и за каркасом скважин, а сама желонка действует в скважине как поршень. В результате этого по окончании промывки (для восстановления первоначального уровня) вода с большой скоростью устремляется в скважину. В этот момент вместе с водой внутрь каркаса проникает большое количество илистых частиц, которые, осаждаясь, снова заиляют фильтры.

Кроме того, каждый раз после подъема желонки из скважины в водоносном слое создается перепад давления, который, в свою очередь, нарушает целостность стенок скважины и увеличивает количество взвешенных частиц. В связи с этим в дальнейшем необходимо избегать применения желонки для очистки от шлама скважин в мелкозернистых песках.

4. В результате неправильного режима эрлифтной откачки, примененного для разглинизации стенок скважин на Шурузякском участке, такой дебит, как 10—20 *л/сек*, разрушает устойчивость стенок и приводит к усиленному продвижению мелких песков в скважину. Дебит эрлифтной откачки для чистки пьезометров должен быть не больше 1,0—2,0 *л/сек*.

5. Малый размер затрубного пространства (в способе засыпки гравия сверху, который был применен на Шурузяке) затруднял погружение гравия вглубь трубы и гравий, по-видимому, не достигал перфорированной части фильтра. Это вполне вероятно, если учесть, что засыпка гравия производилась в глинистый раствор, находящийся в затрубном пространстве. Поэтому можно предполагать, что многие пьезометры находятся в водоносном горизонте без гравийного фильтра.

Практика строительства пьезометров в Голодной степи показала, что единственно верным способом разглинизации стенок скважин и очистки наблюдательных скважин от шлама и проникших в трубу мелких частиц является промывка пьезометров водой, в процессе которой созданный фильтр остается ненарушенным.

Промывка производится двумя способами.

По первому способу по окончании бурения и обсадки фильтра сразу приступают к промывке пьезометров водой через штанги бурового агрегата с помощью грязевого насоса под большим давлением — до 5,0 *атм*. Прокачиваемая насосами чистая вода частично проходит через отверстия каркаса, поры гравийного фильтра, вымывает глинистый раствор, находящийся в затрубном пространстве, и илистый материал и поднимает их под давлением на поверхность по обсадной трубе.

Этим способом в совхозе «Пахта-Арал» установлено 17 кустов наблюдательных скважин, состоящих из двух и трех пьезометров. Фильтры этих пьезометров (рис. 3) приготавливали на поверхности земли из стеклоткани или отсортированного гравия размером 1—3 *мм* и сетки квадратного плетения размером 1×1 *мм* (гравийно-сетчатый).

Гравийно-сетчатые фильтры изготавливают в четыре этапа: I — производится перфорация трубы на длину 0,5 *м* длины. Приваривают дно и опорные кольца, затем трубу покрывают кузбасс-лаком или битумом; II — перфорированную часть трубы обматывают металлической

сеткой размером 1 × 1 *мм*, которую привязывают к трубе проволокой; III — приготавливают металлическую мешковину из сетки нержавею-

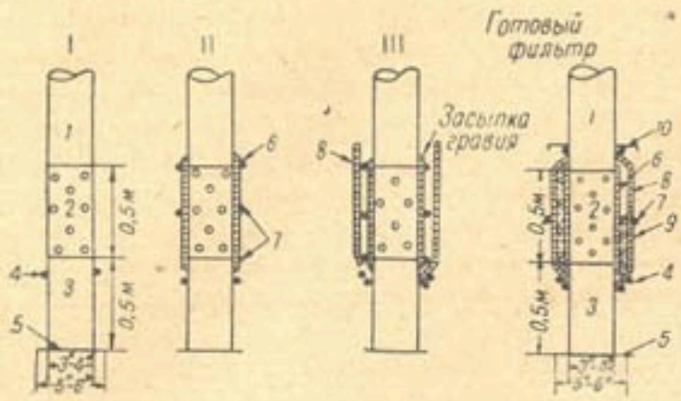


Рис. 3. Гравийно-сетчатый фильтр:

1 — глухая часть каркаса; *2* — перфорированная часть каркаса; $d_{отв}$ = 5—10 *мм*, скважность 10—15%; *3* — отстойник; *4* — упорные кольца для предотвращения срыва фильтра при всадке; *5* — приваренное дно из котельного железа диаметром на 1" больше диаметра трубы; *8—6* — металлическая сетка размером в свету 1×1 *мм*; *7* — проволочная привязка; *9* — гравийная засыпка толщиной 10—15 *мм*; *10* — фланец для предохранения фильтра от повреждения при спуске.

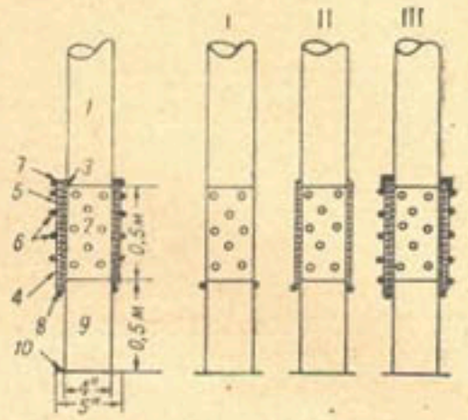


Рис. 4. Фильтр из стеклоткани марки СТФ (б), АСТТ (б) БФЧ:

1 — глухая часть трубы; *2* — перфорированная часть трубы: $d_{отв}$ = 5—10 *мм*, расстояние между отверстиями 12—20 *мм*, скважность 10—15%. $l_{перф.\ части}$ = 400 *мм*; *3* — винипластовая обмотка (два слоя) $d_{отв}$ = 2,8 *мм*; *4* — обмотка из стеклотканей; *5* — деревянные планки для закрепления стеклоткани к трубе; *6* — кольцо для закрепления фильтра; *7* — металлический фланец для закрепления фильтра к трубе; *8* — кольцо для закрепления фильтра; *9* — отстойник; *10* — приваренное дно из котельного железа диаметром на 1" больше диаметра трубы (для сохранности фильтра); такой диаметр дна играет роль фонарей для защиты фильтра от повреждения.

щей стали диаметром на 1" больше, чем диаметр трубы, и надевают ее на трубу, затем конец мешковины туго привязывают выше опорного кольца. В зазор между внутренней и внешней сеткой засыпают отсортированный гравий размерами фракций 1—3 *мм* и когда зазор заполняется на 5 *см* выше начала перфорированной части, прекращают засыпку. После этого наружную сетку (мешковину) привязывают к трубе ниже фланца; IV — приваривают фланец и фильтр готов.

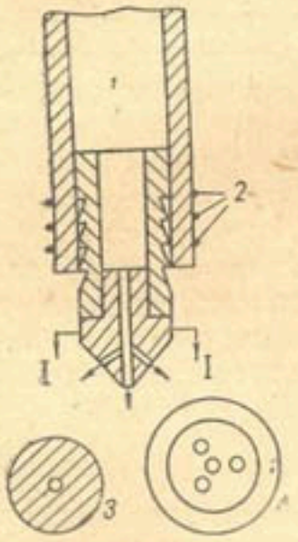


Рис. 5. Наконечник для промывки пьезометров:

1 — резиновый шланг; *2* — проволока для резинового шланга к наконечнику привязки; *3* — разрез I—I; *4* — вид снизу.

Такие фильтры пьезометров, строительство которых заканчивалось промывкой водой через штанги (сразу по окончании обсадки), действовали хорошо. Поэтому в дальнейшем мы считаем возможным рекомендовать этот способ.

По надежности работы хорошие результаты получены у фильтров из стеклоткани (рис. 4).

Фильтр из стеклоткани изготавливают следующим образом: I — выше отстойника трубу перфорируют на 0,4—0,5 *м*, ниже перфорированной части приваривают кольцо из проволоки $д$ = 0,5 *мм*. Дно приваривают круглой металлической пластинкой, затем трубу покрывают кузбасс-лаком или битумом; II — перфорированную часть трубы обертывают винипластовой сеткой (в два круга), которая прикрепляется к трубе при помощи клея БФ-4; III — поверх винипластовой сетки натягивают стеклоткань и приклеивают к трубе клеем БФ-4 (ткань в трубе наклеивают на 5 *см* выше винипластовой сетки). После этого фильтр прижимают к трубе с трех сторон деревянной планкой, при-

вязывают проволокой, а затем прижимают металлическим фланцем.

Второй способ. Если заиление пьезометров произошло в период эксплуатации и не имеется бурового агрегата, то промывку по второму способу следует производить при помощи мотопомпы. Вода нагнетается через прочный резиновый шланг, в конце которого устанавливается наконечник (рис. 5).

По мере вымывания заиленного материала шланг с наконечником постепенно опускают вниз. При этом конец наконечника должен быть расположен на 5—10 *см* выше границы заиления, так как с увеличением этого расстояния создается водяная подушка и в результате этого уменьшается производительность вымыва илистых частиц. Этот способ испытан на пьезометрах Шурузякского участка, где из десяти пьезометров, промывавшихся с помощью мотопомпы, все десять были прочищены от заиления до дна.

ЛИТЕРАТУРА

1 Айропетян Г. Э. Опыт бурения скважин на воду, М., Госгеолтехиздат, 1957.

И. Б. ХАМАДОВ

ИСТЕЧЕНИЕ ВОДЫ ИЗ-ПОД ЗАТВОРОВ С ПЛАВНООБТЕКАЕМЫМИ ОЧЕРТАНИЯМИ НИЖНЕЙ ЧАСТИ ОБШИВОК ИЛИ КОЗЫРЬКОВ

Увеличить пропускную способность гидротехнических сооружений и диапазон расходов воды, проходящей через отверстия сооружения, не изменяя их габаритов, можно не только приданием сооружению обтекаемых форм, но и созданием плавнообтекаемых козырьков и очертаний нижней части обшивок плоских затворов.

Применение обшивок с плавнообтекаемыми очертаниями в нижней части или козырьков к плоскому затвору требует незначительных капитальных затрат (не более 7% стоимости конструкции затвора), увеличивая пропускную способность реконструированных затворов от 20 до 40% и более. Сказанным объясняется значительный интерес к данному вопросу ряда исследователей. Очертания, например, по окружности были рекомендованы еще в конце 30-х годов В. А. Шауляном [1] (радиус закругления $R = 0{,}4\ a_{max}$, где a_{max} — максимальное открытие затвора, средний коэффициент расхода $\mu = 0{,}93$), М. В. Бутыриным [2] ($R \geqslant 0{,}2\ H_{max}$, где H_{max} — максимальный напор воды в верхнем бьефе, $\mu = 0{,}97$), затем П. Г. Киселевым [3] $\left(\frac{a}{R} \leqslant 1{,}0;\ \mu = 0{,}90\right)$, К. А. Захаровой, С. Б. Скворцовым и др.*

С. А. Курсин [4] предлагает козырек, очерченный по форме поверхности сжатой струи, истекающей из-под плоского затвора $\left(\frac{x}{H_{max}} = 0{,}3;\ \frac{y}{H_{max}} = 0{,}1;\ \mu = 0{,}94\right)$.

Наши исследования являются продолжением вышеуказанных работ. Для выбора рационального очертания нижней части обшивки затвора-автомата конструкции автора**, а также возможности применения этих очертаний в виде козырьков к плоскому затвору с целью увеличения пропускной способности сооружений без изменения их размеров были проведены лабораторные исследования.

На основании лабораторных результатов (всего для 5 серий проведено около 810 опытов) получены эмпирические зависимости, вскрыт ряд закономерностей, дополнен и проверен ряд предложенных ранее расчетных формул и зависимостей других авторов.

---

* Для других целей — борьбы с вибрацией затворов — Л. Ф. Линевым и З. Ф. Ничипуренко [5] были исследованы различные плавнообтекаемые очертания уплотняющих брусьев нижней части плоских затворов.

** Авторское свидетельство № 132992.

Модельные установки, методика проведения опытов и их обработка*. Исследование проводили на двух модельных установках — в бетонном лотке (открытая площадка лаборатории регулирования

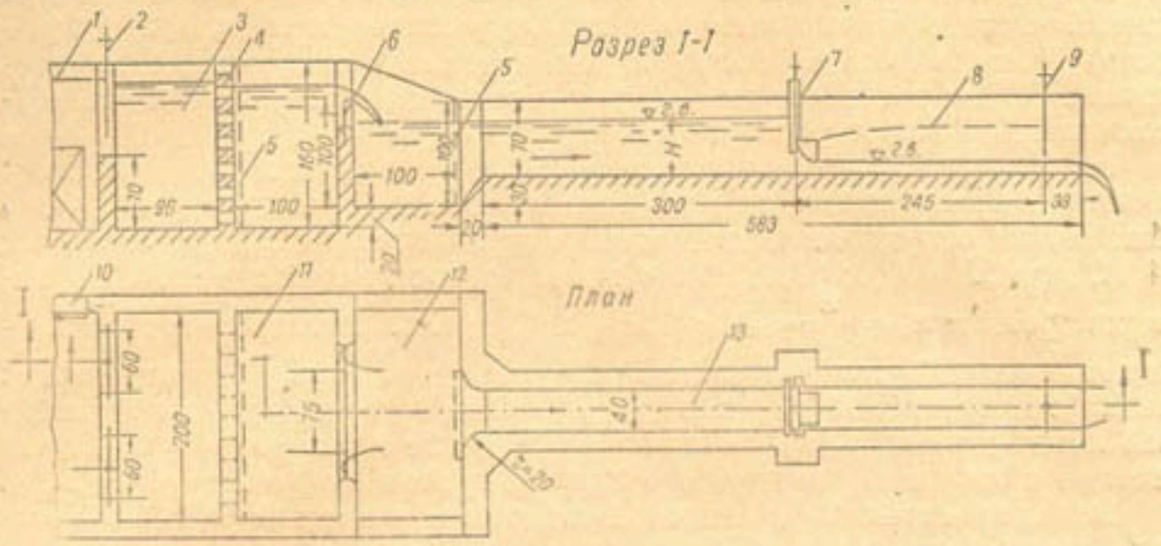


Рис. 1. Схема опытной установки в бетонном лотке (размеры даны в сантиметрах):

1 — бассейн воды (от насосной станции со сбросом); *2* — затворы регулирования подачи расхода воды; *3* — успокоительный бассейн; *4* — решетка; *5* — металлические сетки; *6* — водослив Чиполетти; *7* — модель затвора (металлический, очертание по окружности); *8* — горизонт воды нижнего бьефа при затоплении; *9* — затвор регулирования нижнего бьефа; *10* — отверстие сброса избыточного расхода воды; *11* — бассейн водослива; *12* — бассейн лотка; *13* — бетонный лоток.

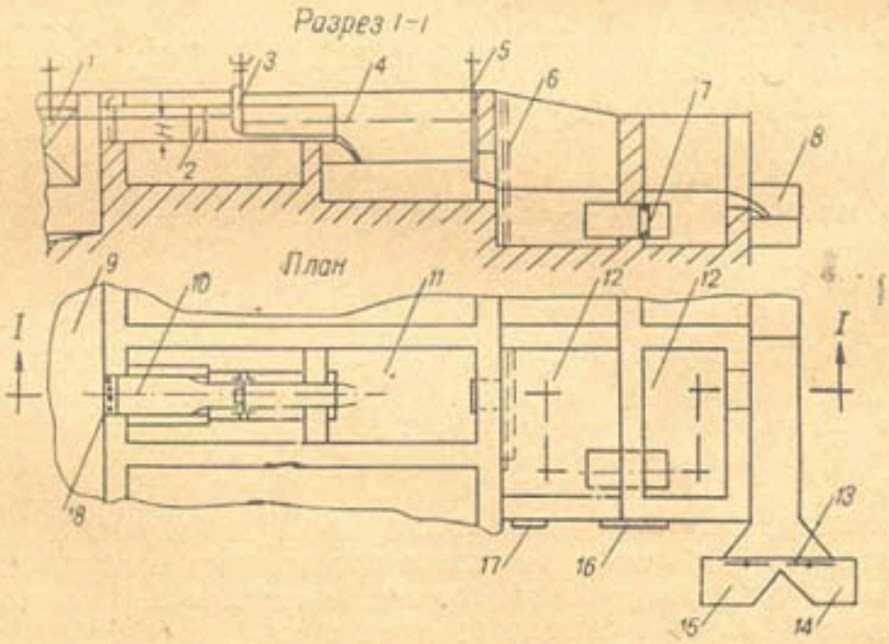


Рис. 2. Схема опытной установки в металлическом лотке:

1 — регулировочный затвор на электрическом приводе (кнопочное управление); *2*—бычки бокового сжатия потока (эллиптического очертания); *3*—модель затвора; *4*—горизонт воды нижнего бьефа при затоплении; *5* — затвор регулирования нижнего бьефа модели; *6* — металлические сетки; *7* — трубчатый водомер с кольцом САНИИРИ; *8* — лоток сброса воды; *9* — успокоительный бассейн; *10* — металлический лоток; *11* — бассейн нижнего бьефа модели; *12* — бассейны водомера; *13* — заслонка; *14* — подача расхода в сброс и *15* — на весы; *16* — наклонный (под 30°) пьезометр водомера; *17* — кнопки управления затвором 1; *18* — направляющие щитки.

---

* Опыты проводились автором под руководством лауреата Сталинской премии, канд. техн. наук Д. П. Колодкевича, затем при консультации члена-корреспондента АН УзССР, доктора техн. наук, проф. М. С. Вызго и канд. техн. наук М. В. Бутырина.

русел рек и водозаборов ИВПиГ АН УзССР — 1957 г., рис. 1) и в металлическом (гидрометрическая лаборатория САНИИРИ — 1958 — —1959 гг., рис. 2).

В проведенных опытах (для возможности сравнения очертаний нижней части обшивки затвора или козырьков по пропускной способности) напор верхнего бьефа H поддерживали постоянным на расстоянии $3H$ от затвора, при боковом сжатии потока бычками на расстоянии $1{,}5 \div 3H$ от бычков.

На первой опытной установке (рис. 1) исследовали истечение воды из-под модели затвора *7* с пятью очертаниями нижней части (козырька) обшивки по окружности, имеющей радиус закругления $R = 0{,}2$; 0,3; 0,4 H, при $H = 50{,}0$; 37,5; 25,0 *см* для относительных открытий затвора, равных $n_1 = \frac{a}{H} = 0{,}1$; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5. Затворы, изготовленные из листовой стали толщиной 2,5 *мм*, двигались в вертикальных пазах (с просветом 4 *мм*) с помощью винтового подъемника. Бетонный лоток длиной 5,83 *м* имел по всей длине прямоугольную форму сечения с шириной по дну $b = 0{,}4$ *м* и уклон по длине ($i = 0{,}001$).

Вода, подаваемая от насосной станции в напорный бассейн, попадала по трубопроводу в успокоительный бассейн, затем в бассейн регулирования *1* (расхода воды при помощи затвора сбросного отверстия *10*) и *3*, наконец, через водослив *6* в бетонный лоток *13* с моделью затвора *7*. Расход воды, колеблющийся в пределах $20 \div 230$ *л/сек*, измеряли трапецеидальным водосливом (Чиполетти) *6* шириной $b_в = 0{,}75$ *м* (установленная тарировкой погрешность измерения менее $\pm 1{,}5\%$).

На второй модельной установке (рис. 2) исследовали 11 очертаний нижней части обшивки затвора *3*, выполненных по следующим уравнениям кривых (при $H = 20$ *см*, $b = 20$ *см*):

а) по эллипсу $\frac{x^2}{R_2^2} + \frac{y^2}{R_1^2} = 1$, где $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$;

б) по окружности $x^2 + y^2 = R_2^2$, где $R_2 = 0{,}2$; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4 H;

в) по параболе $y^2 = \frac{R_1^2}{R_2} x$, где $R_2 = 2\ R_1 = 0{,}4\ H$ и $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$;

г) по гиперболе $\frac{x^2}{R_2^2} - \frac{3y^2}{R_1^2} = 1$, где $R_2 = 2\ R_1 = 0{,}4\ H$ и $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$;

Были также проведены опыты с плоским затвором.

Модели-затворы, изготовленные из листовой стали толщиной 1,0 *мм*, перемещались с помощью винтового подъемника в вертикальных пазах (с просветом 4 *мм*), заполненных салидолом.

Исследования проводили при свободном и затопленном истечении воды из-под затвора с боковым сжатием потока бычками, $\frac{b}{B} = 0{,}625$ и без бокового сжатия. Бычки были эллиптического очертания $\left(\text{с отношением полуосей эллипса } \frac{r_1}{r_2} = 0{,}5 \text{ и } r_1 = \frac{B-b}{2} = 6\ \text{см},\ r_2 = B - b = 12\ \text{см}\right)$. Опыты по исследованию потока без бокового сжатия проводили в металлическом лотке прямоугольного сечения с постоянной шириной по дну лотка $b = 20$ *см* и длиной 168 *см*. При боковом стеснении потока бычками устанавливали лоток с длиной подводящей части 77 *см*, с шириной по дну $B = 32$ *см* и остальной

частью лотка (91 *см*) с шириной по дну $b = 20$ *см*. Лоток второй модели затвора уклона дна не имел.

Вода, подаваемая насосом из подвального бассейна лаборатории в напорный бак постоянного уровня воды, по трубопроводу попадала в успокоительный бассейн *9* (со сбросным затвором кнопочного регулирования *1*), а затем направлялась в металлический лоток с моделью затвора *3*. Расход воды, истекающий из-под затвора и колеблющийся в пределах 2,5÷40,0 *л/сек*, измеряли трубчатым водомером с кольцом конструкции САНИИРИ и весовым способом (с погрешностью измерения менее ± 0,5%). Трубчатый водомер с кольцом имел (для увеличения точности отсчета в 2 раза) пьезометр отбора давления воды с наклоном к горизонту 30°.

На обоих модельных установках затопление потоком нижнего бьефа модели-затвора производили посредством затвора нижнего бьефа (*9* на рис. 1 и *5* на рис. 2).

Открытие затвора *a* определяли с точностью до 0,5 *мм* по делениям реек, укрепленных на затворе и вертикальной стенке лотка. Во избежание перекоса затвора рейки наносили с обеих сторон нижнего бьефа.

Горизонты воды измеряли игольчатыми тастерами с кремальеркой и — где позволяли гидравлические условия — дополнительно пьезометрами.

В процессе опытов измеряли горизонты воды бьефов модели затвора (рис. 3*а*):

H — напор воды верхнего бьефа;

$H_щ$ — напор воды верхнего бьефа непосредственно у обшивки затвора;

h_c — глубина воды в сжатом сечении нижнего бьефа затвора;

$h_щ$ — глубина воды нижнего бьефа непосредственно у обшивки затвора;

h — глубина воды нижнего бьефа в зоне установившегося режима движения потока (бытовая).

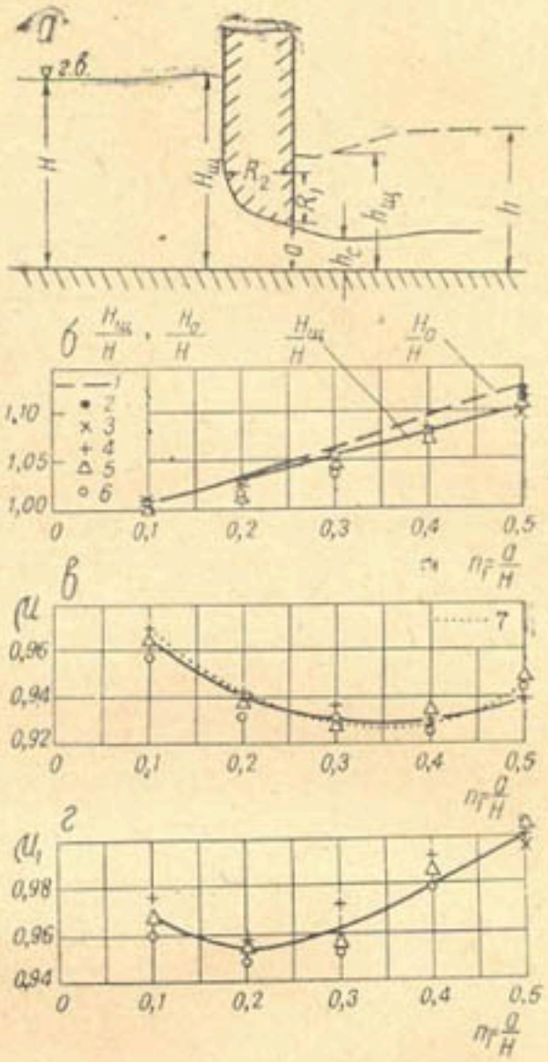


Рис. 3. Гидравлические элементы модели затвора (*а*) и зависимости

$$\frac{H_щ}{H} = f(n_1, R_1); \frac{H_0}{H} = f_1(n_1, R_1) \quad (б),$$

$$\mu = \frac{Q}{ab\sqrt{2g(H_щ - a)}} \quad (в),$$

$$\mu_1 = \frac{Q}{ab\sqrt{2g(H - a)}} \quad (г)$$

для свободного истечения воды из-под затвора с очертанием нижней части обшивки по окружности (опыты проводились в бетонном лотке при $b = B$, $H = \text{const}$):

1 — кривая H_0/H;

опытные точки: *2* — $R_1 = 0{,}2$ $H = 10$ *см*, *3* — $R_1 = 0{,}3$ $H = 15$ *см* и *4* — $R_1 = 0{,}4$ $H = 20$ *см* при $H = 50$ *см*; *5* — $R_1 = 0{,}4H = 15$ *см* при $H = 37{,}5$ *см*; *6* — $R_1 = 0{,}4H = 10$ *см* при $H = 25$ *см*; *7* — по эмпирической зависимости.

Коэффициент расхода вычисляли по формулам

$$\mu = \frac{Q}{ba\sqrt{2g(H_{щ} - h_{щ})}}, \quad (1)$$

$$\mu_1 = \frac{Q}{ba\sqrt{2g(H - h_{щ})}}, \quad (2)$$

(по В. А. Шаумяну)

$$M = \frac{Q}{bH\sqrt{H}}, \quad м^{0,5}/сек, \quad (3)$$

причем, для свободного истечения $h_{щ} \cong h_c$, а для очертаний нижней части обшивки затворов по эллипсу и окружности $R_2 \geqslant 0{,}2H$ имеем $h_c = a$ (вертикальное сжатие струи истечения не наблюдалось). При подтопленном истечении воды из-под затвора опыты показывают — $h_{щ} < h$, а при затопленном истечении $h_{щ}$ (будучи меньше h) приближается по величине к h, что согласуется с результатами работ других авторов, проведенных для плоских затворов [6].

При определении μ по формуле (1) учитывается подходная скорость воды v_0 к затвору в верхнем бьефе, ибо $H_{щ} \approx H_0$ в пределах максимальной расходимости менее 2%, где $H_0 = H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ (рис. 3*б* — опыты проведены в бетонном лотке).

Коэффициент вертикального сжатия равен $\varepsilon = \frac{h_c}{a}$. Из опытов было выявлено, что ε для потока, истекающего из-под затвора, не зависит от бокового сжатия при данных a/H, R_1/H, R_2/H, поэтому коэффициент бокового сжатия определяли как отношение

$$\varepsilon_б = \frac{\mu_{b/B=0,625}}{\mu_{b=B}}.$$

После получения опытных зависимостей для исследуемых очертаний затворов $h_{щ} = f(h)$ при определенных $\frac{a}{H}$ было произведено сопоставление их с зависимостью [6,9]:

$$h_{щр} = \sqrt{h^2 - \frac{2Q^2}{b^2 g}\,\frac{h - h_c}{h \cdot h_c}}.$$

Опытным путем были получены зависимости

$$\frac{\Delta h_{щ}}{H} = f\left(\frac{\Delta h}{H}\right),$$

где $\Delta h_{щ} = h_{щ} - h_c$; $\Delta h = h - h_c^c$;

$$h_c^c = \frac{h_c}{2}\left(\sqrt{1 + \frac{8Q^2}{b^2 g h_c^3}} - 1\right)$$

и ряд других зависимостей, сопоставлений.

Результаты лабораторных исследований показали следующее.

1. При сравнении по наилучшей пропускной способности расхода воды из-под затвора (по μ, μ_1, M) имеется следующая последовательность в зависимости от очертания нижней части обшивки: эллипс, окружность, парабола, гипербола $\left(\text{для одинаковых } \frac{a}{H}, \frac{b}{B}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$.

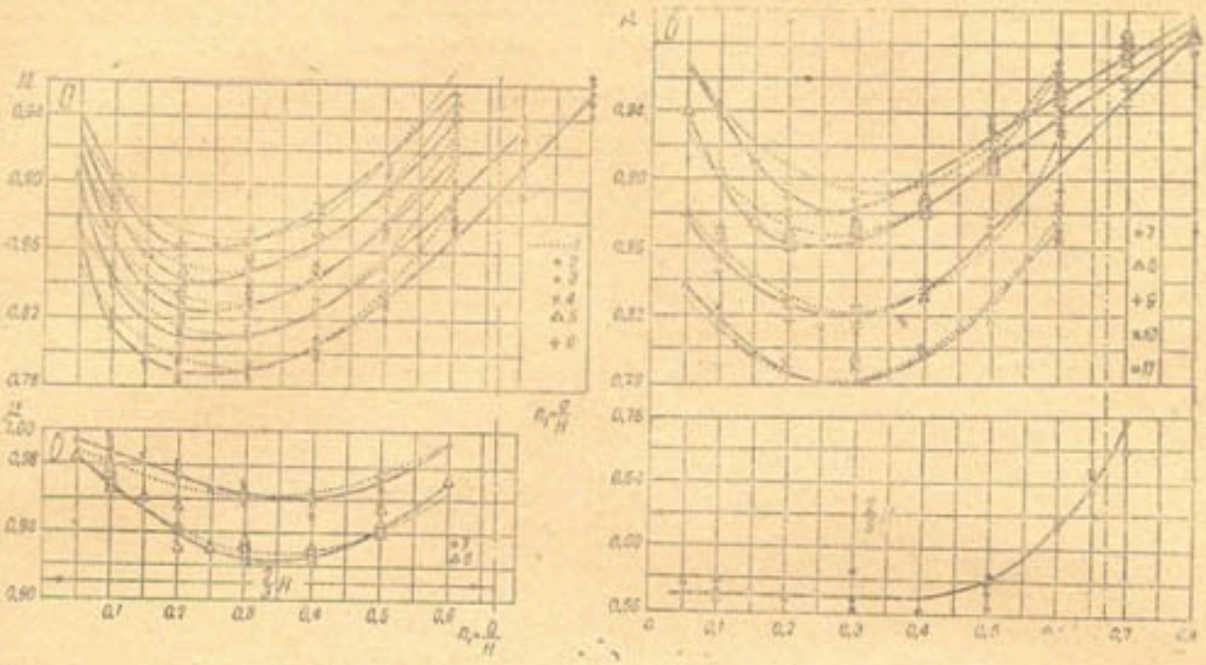


Рис. 4. Зависимости $\mu = f\left(\frac{R}{H}, \frac{R_2}{H}, \frac{a}{H}, \frac{b}{B}\right)$ для свободного и затопленного истечения воды из-под затвора:

1 — кривые, полученные по эмпирическим данным;

опытные точки: *а* — при $b/B = 0{,}625$ (очертание по окружности): *2* — $R = 0{,}2\ H$; *3* — $R = 0{,}25\ H$; *4* — $R = 0{,}3\ H$; *5* — $R = 0{,}35\ H$; *6* — $R = 0{,}4\ H$;

б — при $b = B$;

в — при $b/B = 0{,}625$ (различные очертания): *7* — по эллипсу $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$; *8* — по окружности $R = 0{,}4\ H$; *9* — по параболе $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$; *10* — по гиперболе $R_2 = 2R = 0{,}4\ H$; *11* — плоский затвор.

2. Для очертаний обшивки затвора по окружности чем больше относительный радиус закругления $\frac{R}{H}$, тем выше пропускная способность при одинаковых прочих условиях.

3. При относительных открытиях затвора $\frac{a}{H} = 0{,}05 \div 0{,}6$ (для свободного истечения воды) и $\frac{a}{H} = 0{,}05 \div 0{,}8$ (для затопленного), а также определенном $H = \text{const}$, $\frac{b}{B}$ каждое очертание обшивки затвора $\left(\text{с определенными конструктивными параметрами } \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$ имеет одну закономерную кривую (рис. 4) зависимости

$$\mu = f\left(\frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}, \frac{a}{H}, \frac{b}{B}\right)$$

или

$$\mu_1 = f_1\left(\frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}, \frac{a}{H}, \frac{b}{B}\right)^{*}.$$

---

* Для свободного истечения воды из-под затворов значения μ приводятся в работе [10], а также часть значений μ и μ_1, полученных на модели в бетонном лотке, на рис. 3*в*, *г*.

Разброс опытных точек в лабораторных исследованиях М. В. Бутырина, С. А. Курсина и других с невозможностью нахождения зависимости $\mu = f(n_1)$ объясняется истечением воды из-под затвора (из-под одного и того же затвора с определенным очертанием и конструктивными параметрами $\frac{R_1}{H}$, $\frac{R_2}{H}$) при различных напорах воды в верхнем бьефе от H_{min} до H_{max}.

4. Коэффициент расхода μ, определяемый по формуле (1), для каждого из исследованных очертаний обшивки затвора, при данных $\frac{R_1}{H}$, $\frac{R_2}{H}$, $\frac{a}{H}$, $\frac{b}{B}$, имеет постоянную величину (в пределах 2% точности) независимо от истечения воды из-под затвора — свободного, затопленного, — но для глубин $H_щ$ и $h_щ$, измеренных непосредственно у обшивки затвора в верхнем и нижнем бьефах (рис. 4).

В результате обработки опытных данных получены эмпирические зависимости (с максимальными расхождениями с опытными менее $\pm 2{,}5\%$) для очертаний нижней части обшивки затвора при $n_1 = 0{,}05 \div 0{,}6$:

а) по окружности с $R = 0{,}2 \div 0{,}4\ H$

при $b = B$

$$\mu = 1{,}004 - 0{,}3\left(0{,}4 - \frac{R}{H}\right) + 0{,}6\, n_1^2 - 0{,}43\, n_1, \tag{4}$$

при $b/B = 0{,}625$

$$\mu = 0{,}948 - 0{,}38\left(0{,}4 - \frac{R}{H}\right) + 1{,}03\, n_1^2 - 0{,}58\, n_1; \tag{5}$$

б) по эллипсу с $R_2 = 2\,R_1 = 0{,}4\ H$

при $b = B$

$$\mu = 1 + 0{,}39\, n_1^2 - 0{,}24\, n_1, \tag{6}$$

при $b/B = 0{,}625$

$$\mu = 1 + 0{,}98\, n_1^2 - 0{,}65\, n_1; \tag{7}$$

в) по параболе с $\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5 \div 1{,}0$ и $R_2 = 0{,}4\ H$

при $b = B$

$$\mu = 0{,}920 - 0{,}18\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + 0{,}55\, n_1^2 - 0{,}36\, n_1; \tag{8}$$

при $b/B = 0{,}625$

$$\mu = 0{,}912 - 0{,}15\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + n_1^2 - 0{,}60\, n_1; \tag{9}$$

г) по гиперболе с $\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5 \div 1{,}0$ и $R_2 = 0{,}4\ H$

при $b = B$

$$\mu = 0{,}880 - 0{,}188\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + 0{,}45\, n_1^2 - 0{,}28\, n_1, \tag{10}$$

при $b/B = 0{,}625$

$$\mu = 0{,}851 - 0{,}172\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + 0{,}91\ n_1^2 - 0{,}50\ n_1. \qquad (11)$$

Характер расположения кривых

$$\mu = f\left(\frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}, \frac{a}{H}, \frac{b}{B}\right)$$

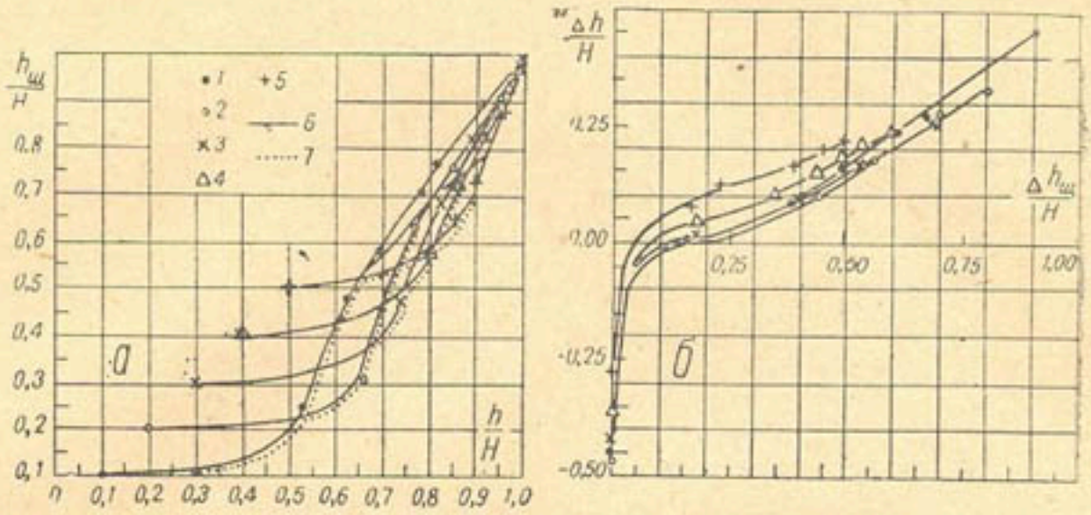


Рис. 5. Кривые зависимостей для очертаний нижней части обшивки затвора по окружности ($R = 0{,}4\ H = 8$ *см* при $b = B$):

а: $h_щ/H = f\left(\frac{h}{H}\right)$

б: $\Delta h_щ/H = f(\Delta h/H)$

опытные точки: $1 - n_1 = 0{,}1$; $2 - n_1 = 0{,}2$; $3 - n_1 = 0{,}3$; $4 - n_1 = 0{,}4$; $5 - n_1 = 0{,}5$;

обозначения кривых: 6 — граница глубин h_c^c/H; 7 — по расчету.

следующий: от максимальных значений μ при $n_1 = 0{,}05$ происходит медленное убывание μ по величине до $n_1 = 0{,}2 \div 0{,}4$, а затем — постепенное возрастание значений μ при больших открытиях. Это, очевидно, можно объяснить следующими обстоятельствами: затвор с плавно обтекаемыми очертаниями нижней части обшивки при малых открытиях работает как плавно обтекаемый насадок (кроме этого, наблюдается малая фильтрация воды из пазов затвора; затем, при увеличении открытия затвора, работа плавнообтекаемого очертания обшивки затвора как насадка ослабевает и сказывается общее вертикальное сжатие движущегося потока затвором (создавая минимальные значения μ, при $n_1 = 0{,}2 \div 0{,}4$) и, наконец, при дальнейшем увеличении открытия затвора происходит убывание общего вертикального сжатия потока.

5. Отрыв потока от очертания обшивки затвора при свободном истечении воды с работой отверстия, как водослива с широким порогом, происходит для $b < B$ при $a \approx \frac{2}{3} H$.

6. Для исследованных очертаний обшивок затвора глубина воды $h_щ$ нижнего бьефа непосредственно у затвора связана с глубиной потока h (бытовой) в пределах $\pm 3\%$ точности от опытных зависимостью

$$h_щ = \sqrt{h^2 - \frac{2Q^2}{b^2 g} \cdot \frac{h - h_c}{h \cdot h_c}}, \qquad \text{(рис. 5 } a, б\text{)}$$

которая выведена другими авторами для плоского затвора [6, 9].

7. Коэффициент расхода по проф. В. А. Шаумяну

$$M = \frac{Q}{bH\sqrt{H}} \quad [1]$$

характеризует пропускную способность затворов. По полученным опытным зависимостям

$$M = f\left(\frac{a}{H}, \frac{h}{H}, \frac{b}{B}\right)$$

(для примера приводится рис. 6*а*), при определенных конструктивных габаритах очертаний затвора $\left(\frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$ можно определить расход воды, истекающий из-под затвора:

$$Q = bMH\sqrt{H}. \qquad (3')$$

Аналогично этот расход воды можно определить по следующим формулам, используя опытные данные μ и μ_1: с учетом скорости подхода воды к затвору в напоре H

$$Q = \mu ba\sqrt{2g(H_{щ} - h_{щ})}, \qquad (1')$$

так как $H_{щ} \approx H_0$, и без учета этой скорости

$$Q = \mu_1 ba\sqrt{2g(H - h_{щ})}. \qquad (2')$$

В. Б. Дульнев предлагает формулу определения расхода воды, свободно истекающего из-под сегментного затвора и с наклонным полотнищем [7, 8]

$$Q = \mu_2 b\sqrt{2g}H^{3/2},$$

$$\text{где } \mu_2 = \varphi f\sqrt{\frac{1-f}{1-\varphi^2 f^2}},$$

которая учитывает скорость подхода воды к затвору и где φ — коэффициент скорости, а $f = h_c/H$ — относительная глубина в сжатом сечении, определяемая по графику $f = \psi(n_1, \alpha^\circ)$, α° — угол наклона полотнища затвора к горизонтам или угол между касательной к обшивке сегментного затвора в месте выхода струи (в нижний бьеф) с горизонталью). При сопоставлении с опытными данными для плоского затвора

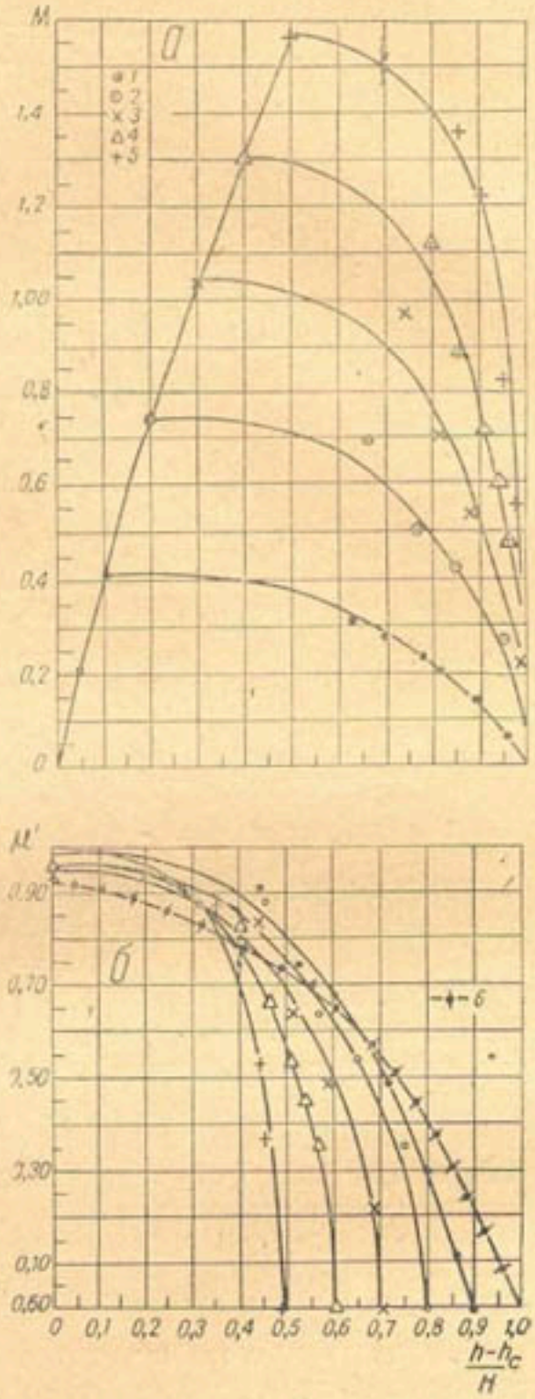


Рис. 6. Кривые зависимостей для очертаний нижней части обшивки затвора по окружности ($R = 0{,}4\ H = 8$ *см* при $b = B$):

а: $M = f\left(\frac{a}{H}, \frac{h}{H}\right)$;

б: $\mu' = f\left(\frac{h - h_c}{H}\right)$;

опытные точки: *1* — $n_1 = 0{,}1$; *2* — $n_1 = 0{,}2$; *3* — $n_1 = 0{,}3$; *4* — $n_1 = 0{,}4$; *5* — $n_1 = 0{,}5$; *6* — кривая по В. А. Шаумяну.

(частный случай $\alpha° = 90°$) формула В. Б. Дульнева дает очень хорошую сходимость (не более 2,5%).

Формулу, рекомендованную В. Б. Дульневым для сегментных затворов и затворов с наклонными полотнищами, мы попытались распространить на затворы с плавнообтекаемыми очертаниями нижней части обшивки, что, однако, не увенчалось успехом. Угол $\alpha°$ не может для наших случаев характеризовать всю форму очертания обшивки. Например, для очертания по окружности и по эллипсу $\alpha° = 0°$, а значения μ для определенного n_1 различные.

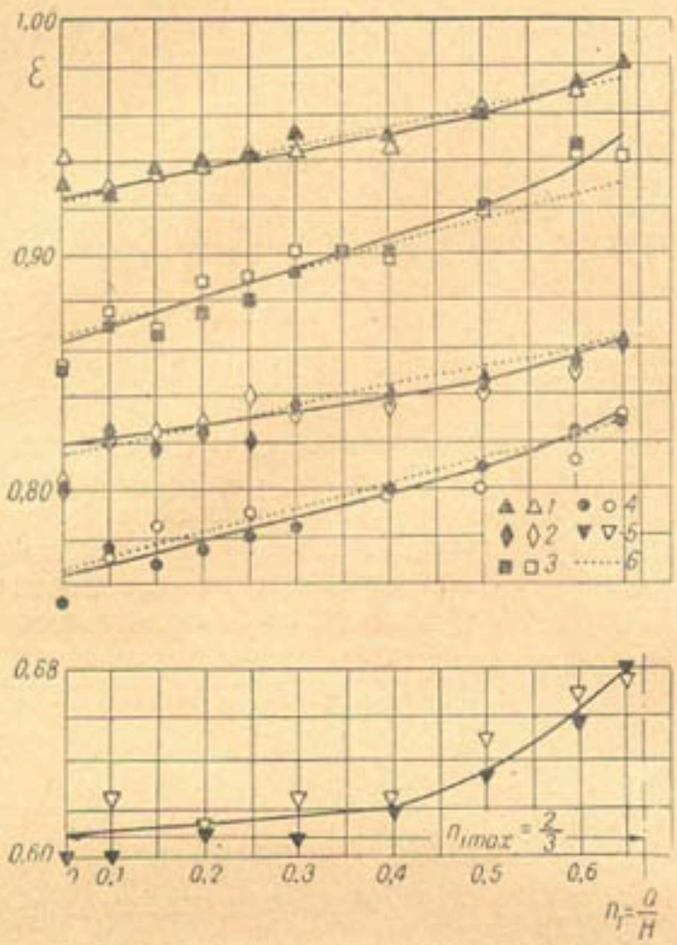


Рис. 7. Кривые $\varepsilon = f\left(\frac{a}{H}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$:

опытные точки:

по параболе: 1 — $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$, 2 — $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$;
по гиперболе: 3 — $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$, 4 — $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$;
5 — плоский затвор (светлые точки при $b = B$, темные — при $b/B = 0{,}625$);
6 — по эмпирическим зависимостям.

8. Наши исследования различных очертаний нижней части обшивки затвора подтверждают параболическую форму кривой зависимости проф. В. А. Шаумяна (найденной им для плоского затвора и козырька по окружности с $R = 0{,}4\ a_{max}$, в виде $\mu' = f\left(\frac{h - h_c}{H}\right)$, где

$$\mu' = \frac{Q}{ba\sqrt{2g(H - h_c)}},$$

но выражается не одной кривой (например, рис. 6б), а семейством кривых (соответствующих значениям $\frac{a}{H}$). Это приводит к тому, что расчетные формулы проф. В. А. Шаумяна (72) и (99) для определения расхода воды, приводимого в его работе [1], дают большие погрешности и неприменимы при условиях больших затоплений нижнего бьефа затвора (особенно при больших открытиях).

9. Коэффициент вертикального сжатия потока $\varepsilon = f\left(\frac{a}{H}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$ для исследованных очертаний обшивок затвора (рис. 7) не зависит от бокового сжатия $\left(\frac{b}{B} = 1 \div 0{,}625\right)$ и выражается линейными эмпирическими зависимостями (кроме плоского затвора) при $n_1 = 0{,}05 \div 0{,}7$ (с точностью $\pm 2\%$ от опытных)

а) по окружности с R_2 и по эллипсу с $\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5$

$$R_2 > 0{,}2\ H \qquad \varepsilon = 1{,}0; \tag{12}$$

б) по параболе с $\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5 \div 1{,}0$ и $R_2 = 0{,}4\ H$

$$\varepsilon = 0{,}92 - 0{,}22\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + 0{,}083\ n_1; \qquad (13)$$

в) по гиперболе с $\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5 \div 1{,}0$ и $R_2 = 0{,}4\ H$

$$\varepsilon = 0{,}86 - 0{,}20\left(\frac{R_1}{R_2} - 0{,}5\right) + 0{,}1075\ n_1. \qquad (14)$$

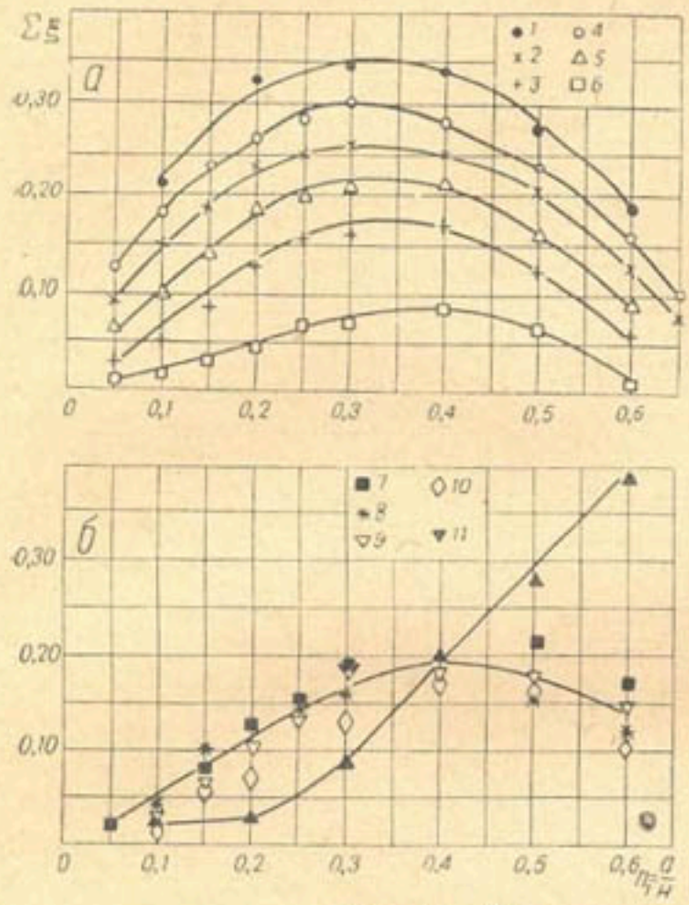


Рис. 8. Кривые $\Sigma\xi = f\left(\frac{a}{H}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$ при свободном истечении воды из-под затвора, для $H = \text{const}$ (без бокового сжатия потока $b = B$):

опытные точки для очертаний нижней части обшивки затвора:

а — по окружности: *1* — $R_1 = 0{,}20H$; *2* — $R_1 = 0{,}30\ H$; *3* — $R_1 = 0{,}40\ H$; *4* — $R_1 = 0{,}25\ H$; *5* — $R_1 = 0{,}35\ H$; по эллипсу: *6* — $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$;

б — по параболе: *7* — $R_2 = 2\ R_1 = 0{,}4\ H$; *8* — $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$; по гиперболе: *9* — $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$; *10* — $R_2 = R_1 = 0{,}4\ H$; *11* — плоский затвор.

10. Сумма коэффициентов гидравлического сопротивления $\sum\xi$, подсчитанных по формуле $\sum\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$ (где φ получается из равенства $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$), является функцией относительного открытия, габаритов исследованных очертаний нижней части обшивки затвора при $H = \text{const}$ и определенных условиях подхода потока к затвору, т. е.

$$\sum\xi = f\left(\frac{a}{H}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right).$$

По распределению кривых зависимостей $\sum\xi = f\left(\frac{a}{H}, \frac{R_1}{H}, \frac{R_2}{H}\right)$ очертания обшивки затвора могут быть подразделены на две группы:

а) когда отсутствует вертикальное сжатие потока в нижнем бьефе;

б) когда существует вертикальное сжатие потока, истекающего из-под затвора, в нижнем бьефе.

К первой группе относятся очертания нижней части обшивки затвора по окружности и по эллипсу (рис. 8*а*), причем для окружности чем больше $\frac{R}{H}$ (для $R = 0{,}2 \div 0{,}4\ H$), тем меньше $\sum\xi$; для эллипса $\left(\frac{R_1}{R_2} = 0{,}5;\ R_2 = 0{,}4\ H\right)$ значения $\sum\xi$ еще меньше, чем для окружности (с $R_2 = 0{,}4\ H$).

Ко второй группе относятся другие исследованные очертания нижней части затвора (по параболе, по гиперболе), включая плоский затвор, которые имеют свои закономерности $\sum\xi$ (рис. 8*б*).

11. Полученные опытные коэффициенты бокового сжатия потока

$$\varepsilon_б = \frac{\mu_{b/B=0,625}}{\mu_{b=B}}$$

для исследованных очертаний обшивок затвора показывают, что $\varepsilon_б$ при $H = \text{const}$ зависит еще от относительного открытия затвора $\frac{a}{H}$, причем в пределах максимальных расхождений $\pm 2,5\%$ с опытными можно выделить общую закономерность $\varepsilon_б = f(n_1)$ для эллипса и окружности, для параболы и гиперболы и отдельно для плоского затвора (рис. 9).

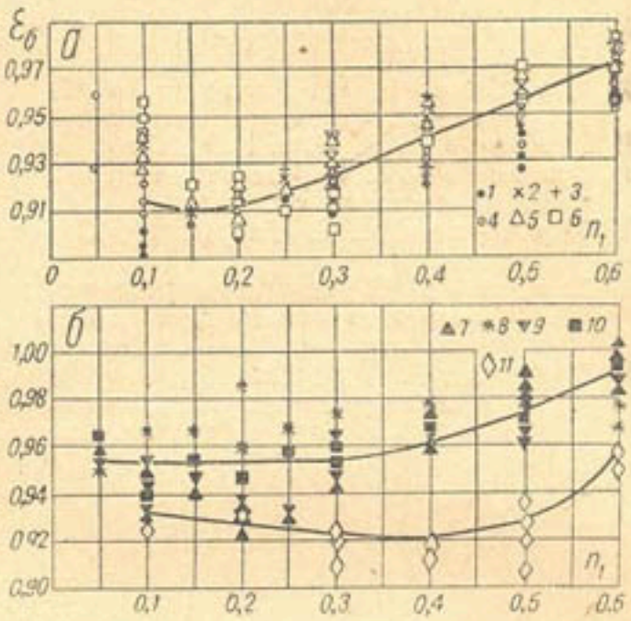


Рис. 9. Кривые $\varepsilon_б = f(n_1\ R_1/H,\ R_2/H)$ при боковом сжатии потока бычками $b/B = 0,625$:

опытные точки:

а — по окружности: *1* — $R_1 = 0,20H$; *2* — $R_1 = 0,30\ H$; *3* — $R_1 = 0,40\ H$; *4* — $R_1 = 0,25\ H$; *5* — $R_1 = 0,35\ H$; по эллипсу: *6* — $R_2 = 2R_1 = 0,4\ H$; по параболе: *7* — $R_2 = 2R_1 = 0,4\ H$; *8* — $R_2 = R_1 = 0,4\ H$;
б — по гиперболе: *9* — $R_2 = 2R_1 = 0,4\ H$; *10* — $= R_2 = R_1 = 0,4\ H$;
11 — плоский затвор.

Боковое сжатие при определении расхода воды, истекающего из-под затвора (для исследованных очертаний обшивки), может быть учтено по формуле проф. М. Д. Чертоусова [9], выведенной для плоских затворов

$$Q = \frac{\mu b H^{3/2} n_1 \sqrt{2g(1-\tau_h)}}{\sqrt{1-\alpha\mu^2\beta^2 n_1^2}},$$

где $\tau_h = \frac{h_ш}{H}$; $\beta = \frac{b}{B}$ и α — корректив кинетической энергии потока.

В определении расхода виды, истекающего из-под исследованных очертаний обшивок затвора, по формуле имеем максимальные расхождения с опытными данными до $\pm 7\%$, которые, очевидно, можно объяснить тем, что в отношении $\beta = \frac{b}{B}$ не учитывается форма бычков и изменение коэффициента $\varepsilon_б$ в зависимости от относительного открытия затвора $\frac{a}{H}$.

12. Рекомендуется применение очертаний по эллипсу

$$\left(\frac{R_1}{R_2} = 0,5\right)$$

и по окружности с $R_2 \geqslant 0,2\ H_{max}$ в виде козырьков и обшивок нижней части затвора к плоскому затвору. Эти очертания обшивки и козырьки затворов увеличивают пропускную способность отверстий сооружений на 20—40% и тем более, чем больше относительный радиус очертания $\frac{R_2}{H}$ [10, 11].

Конструктивное выполнение козырьков можно найти в работах М. В. Бутырина [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаумян В. А. Научные основы орошения и оросительных сооружений, М., Сельхозгиз, 1948.
2. Бутырин М. В. Учет оросительной воды гидротехническими сооружениями, М., Сельхозгиз, 1951.
3. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам, М.—Л., Госэнергоиздат, 1950.
4. Курсин С. А. Щит с козырьком как гидравлический элемент водомера, ИМА АН УССР, Автоматический контроль и измерительная техника, вып. 2, Киев, 1958.
5. Линев Л. Ф., Ничипуренко З. Ф. „Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 1946, 31.
6. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т. и Пикалов Ф. И. Гидравлика, М.—Л., Госэнергоиздат, 1954.
7. Дульнев В. Б. „Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 1958, 61.
8. Дульнев В. Б. Определение натурных характеристик сооружений ГЭС, М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
9. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс, М. — Л., Госэнергоиздат, 1957.
10. Хамадов И. Б. Гидродинамические силы воздействия потока на автоматический затвор гидравлического действия, регулирующий постоянный горизонт воды верхнего бьефа, Труды САНИИРИ, вып. 107, Ташкент, 1960.
11. Хамадов И. Б. Обтекание потоком обшивки затвора с различными очертаниями нижней части, В сб. „Некоторые вопросы гидравлики, ирригации, горного дела и электроники", Ташкент, АН УзССР, 1961.

И. Б. ХАМАДОВ

ЛАБОРАТОРНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЗАТВОР-АВТОМАТ

Распределение давления воды на поверхность обшивки затвора (различного очертания), обтекаемого потоком, приходится находить экспериментальным путем для того, чтобы:

а) выяснить физическую сторону обтекания потоком данной обшивки затвора;

б) проверить правильность принятого очертания обшивки затвора;

в) произвести не только расчет на прочность отдельных частей затвора, но и расчёт габаритов дополнительных корректирующих элементов конструкции затвора для работы его как автомата, регулирующего необходимый параметр;

г) подтвердить теоретические и эмпирические зависимости для определения гидродинамических сил давления потока на обшивку подвижной части затвора.

В целях подтверждения расчетных формул автора [4] для определения гидродинамических сил воздействия потока и затвора-автомата с плавнообтекаемыми очертаниями нижней части обшивки [5] были проведены лабораторные исследования в бетонном лотке (открытая площадка лаборатории регулирования русел рек и водозаборов ИВПиГ АН УзССР) с $b = 40$ *см*, $H = 50$ *см* и в металлическом (гидрометрическая лаборатория САНИИРИ) с $b = 20$ *см*, $H = 20$ *см**.

В опытах исследовали очертания нижней части обшивки затворов-моделей:

1) в бетонном лотке — по окружности $R = 0{,}4\ H$, где $H = 50$ *см* (без бокового сжатия потока $b = B$);

2) в металлическом лотке — по окружности $R = 0{,}4\ H$, по эллипсу, параболе и гиперболе с $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H$, где $H = 20$ *см* (без бокового сжатия потока $b = B$ и с боковым сжатием потока $b/B = 0{,}625$, осуществленным бычками эллиптического очертания). Испытывали также плоский затвор.

Для возможности сравнения очертаний обшивок затвора напор верхнего бьефа H поддерживали постоянным (на расстоянии $3H$ или $1{,}5 \div 3\ H$ от бычков) с диапазоном изменения масштаба напора на модели $50/20 = 2{,}5$ раза.

Истечение воды из-под затвора было свободным и затопленным. Для определенного открытия каждого исследуемого затвора ($a/H = 0{,}1$;

* Подробно опытные установки описаны в работе [7], а чертеж модели в металлическом лотке приведен в работе [8].

0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6;) и поддерживаемого напора $H = \text{const}$ нижний бьеф затвора последовательно (4—6 раз) затапливали потоком — от свободного истечения воды из-под модели до полного затопления (при помощи щитков бассейна нижнего бьефа опытной установки).

Распределение давления потока на обшивку затвора и дно лотка было получено на модели путем осуществления так называемого дренажа, т. е. в каждой определенной точке поверхности исследуемого тела располагали индивидуальную трубочку-штуцер небольшого внутреннего диаметра (1,5—2,0 *мм*). Дренированные отверстия (штуцера) были расположены нормально к поверхности обшивки затвора (с расстоянием от 5 до 25 *мм*) или поверхности дна лотка (с расстоянием от 50 до 200 *мм*). На поверхности тела трубочка-штуцер заканчивалась приемным отверстием давления воды — резиновой трубочкой, надетой на штуцер. Другой конец резиновой трубочки присоединяли к батарейному пьезометру (с числом пьезометров, доходящим в опытах до 34). Каждая стеклянная трубочка батарейного пьезометра с отбором давления воды соответствовала определенной точке поверхности обшивки затвора или дна лотка. Отсчеты по пьезометрам брали по нижнему мениску жидкости в них с точностью ± 1 *мм*. По данным замеров гидродинамическое давление потока в точках отбора (с нормальным направлением к поверхности исследуемого тела) вычисляли следующим образом:

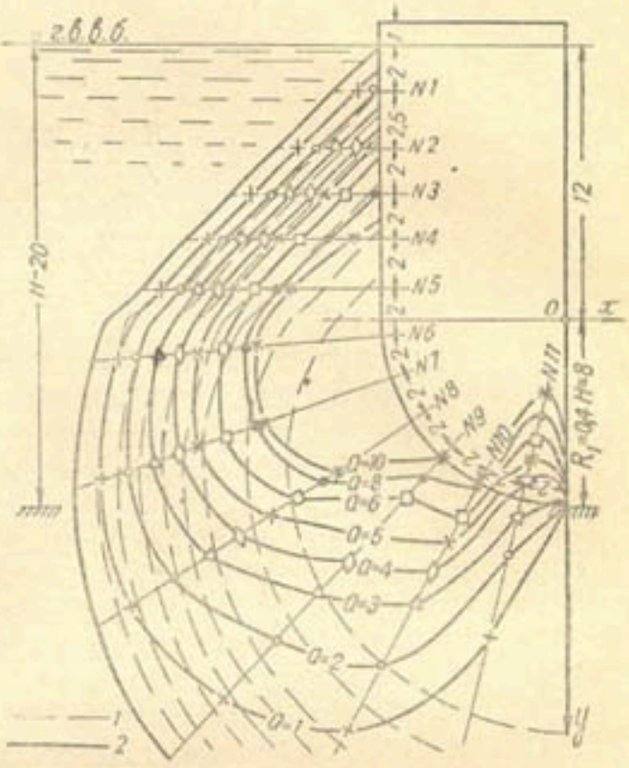


Рис. 1. Распределение давления воды на поверхность обшивки затвора, обтекаемого потоком (истечение воды из-под затвора — свободное, $b = B$; очертание нижней части обшивки по окружности $R_1 = 0{,}4\ H = 8$ *см*): давление воды: *1* — гидростатическое; *2* — гидродинамическое.

где γ — объемный вес воды;

h_{a_i} — показание пьезометра для данной точки отбора давления потока на обшивку затвора (высота воды в пьезометре над дном лотка);

a — открытие затвора;

h_i — высота положения точки отбора давления воды над уровнем нижней кромки обшивки затвора.

По вычисленным значениям гидродинамического давления потока в определенных точках обшивки затвора строили эпюры давления воды:

а) при отложении значений p в точках нормально к поверхности обшивки затвора получали эпюру давления силы F (например, рис. 1, 2; размеры даны в сантиметрах).

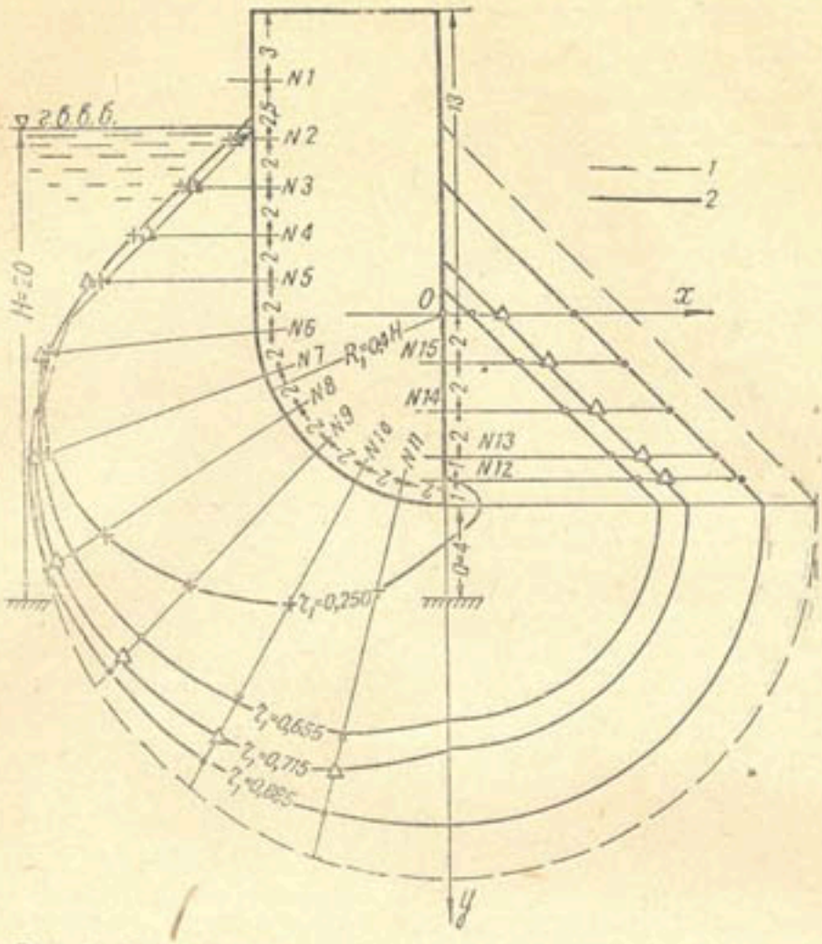


Рис. 2. Распределение давления воды на поверхность обшивки затвора, обтекаемого потоком (очертание нижней части обшивки по окружности $R_1=0{,}4\ H=8$ *см*) при $b=B$, $a=4$ *см* и различных затоплениях нижнего бьефа

давление воды: *1* — гидростатическое; *2* — гидродинамическое.

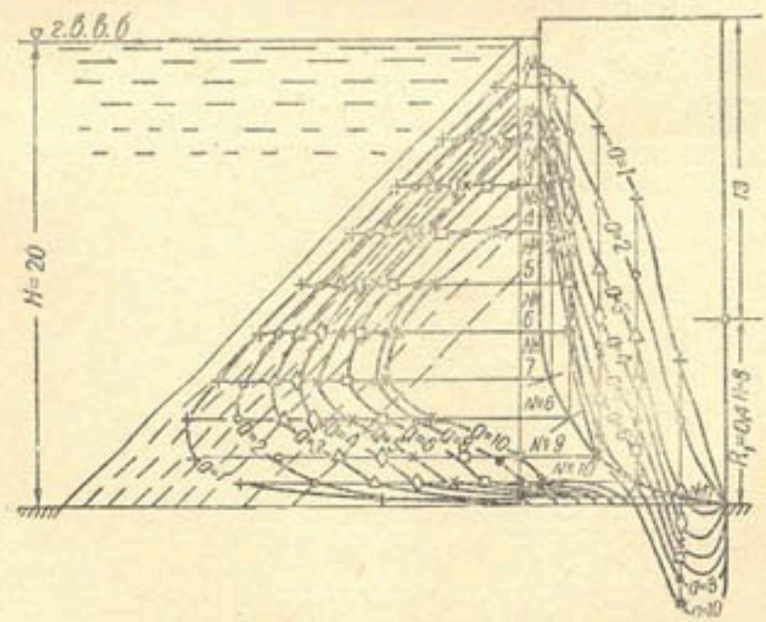
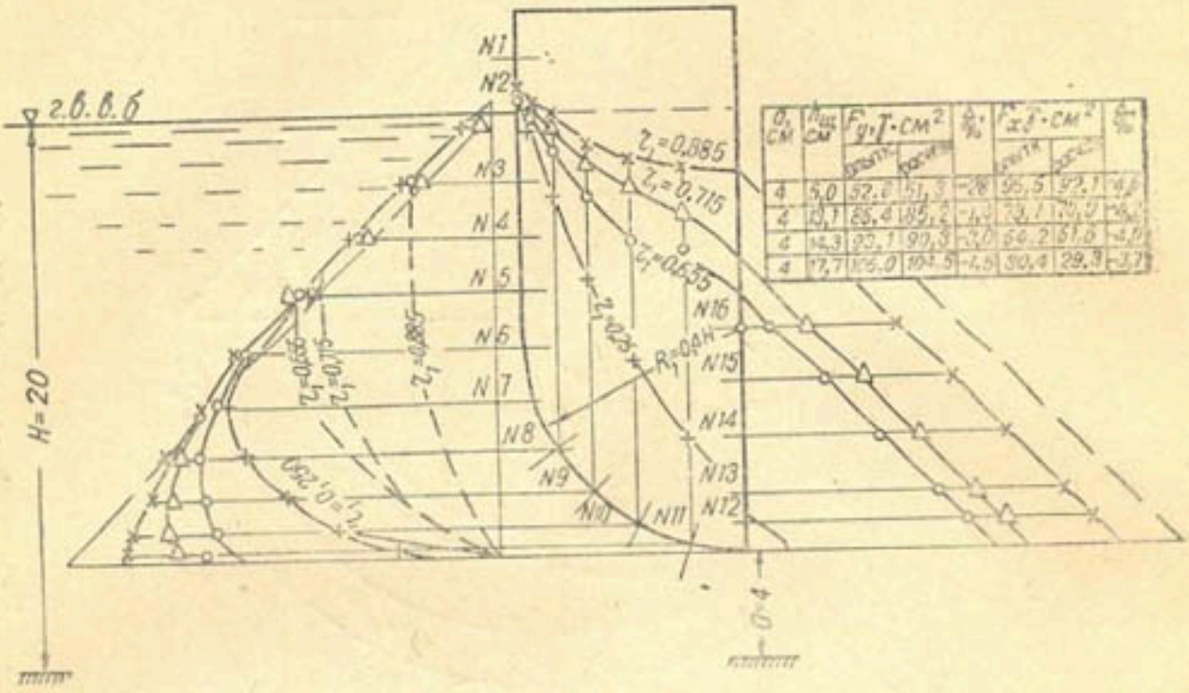


Рис. 3. Эпюры вертикальных и горизонтальных сил давления потока на обшивку затвора с очертанием нижней части по окружности $R_1=0{,}4\ H=8$ *см*, при свободном истечении затвора, $b=B$.

б) при отложении значений p по горизонтали в точках поверхности обшивки затвора получали эпюру давления силы F_x, при отложении значений p по вертикали — эпюру давления F_y (например, рис. 3, 4; размеры даны в сантиметрах), так как считаем $p = p_x = p_y$.



O, см	$h_{щ}$ см	F_y, т·см²		$\frac{\Delta F_y}{F_y}$, %	F_x, т·см²		$\frac{\Delta F_x}{F_x}$, %
		опытн.	расчетн.		опытн.	расчетн.	
4	5,0	57,6	51,3	-2,8	95,5	92,1	-4,8
4	10,1	85,4	185,2	-1,4	78,7	76,0	-3,4
4	14,3	90,1	90,3	-2,0	64,2	61,0	-4,0
4	17,7	105,0	104,5	-4,5	30,4	29,3	-3,7

Рис. 4. Эпюры вертикальных и горизонтальных сил давления потока на обшивку затвора с очертанием нижней части по окружности $R_1 = 0{,}4\ H = 8$ *см*, при различных затоплениях нижнего бьефа водой, $b = B$ и $a = 4$ *см*.

Строго говоря, благодаря силам трения, которые возникают в движущейся реальной жидкости, гидродинамическое давление в точке оказывается зависящим от направления, в отличие от давлений гидростатического или гидродинамического в идеальной жидкости [3], т. е. $p_x \neq p_y \neq p_z$.

Но известно, что $p = \frac{p_x + p_y + p_z}{3} = \text{idem}$ и давления в точке для соответствующих направлений определяются уравнениями:

$$p_x = p - 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x},$$

$$p_y = p - 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y},$$

$$p_z = p - 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

где μ — коэффициент вязкости, т. е., так как обычно величины μ, $\frac{\partial u_x}{\partial x}$, $\frac{\partial u_y}{\partial y}$, $\frac{\partial u_z}{\partial z}$ малы по сравнению с величиной p и, кроме того, гидравлические потери напора учитываются в коэффициенте расхода, входящем в формулу определения гидродинамических сил давления [4], то поэтому приближенно считаем $p \approx p_x \approx p_y$.

Величину составляющих гидродинамической силы давления потока на обшивку затвора F_x, F_y определяли методом численного интегри-

рования (планиметрированием) в расчете на единицу ширины затвора. Экспериментальные и расчетные значения по формулам автора [4]

$$F_y = f(n_1, r_1) \text{ и } F_x = f_1(n_1, r_1),$$

где $n_1 = a/H$, $r_1 = h_щ/H$,
для определенных b/B, H, R_1/H, R_2/H даны на рис. 5, 6, 7.

Для выбора вертикального сечения (параллельного оси лотка) отбора давления по ширине пролета затвора b эпюры давления потока были сняты в трех вертикальных сечениях обшивки затвора и лотка (по оси лотка и на расстоянии 1 *см* от края). Как показали опыты, давление потока в точке вертикального сечения обшивки (затвора или дна лотка) по оси лотка и эпюры незначительно отличались от давления в точках, расположенных на одном уровне, и эпюр давления двух других вертикальных сечений (не более 2%). Поэтому дренирование было осуществлено по вертикальному сечению оси лотка обшивки затвора и дна лотка.

Экспериментальным путем было получено более 25 эпюр гидродинамического давления потока воды на обшивку затвора (без учета пульсаций) и такое же число эпюр давления на дно лотка.

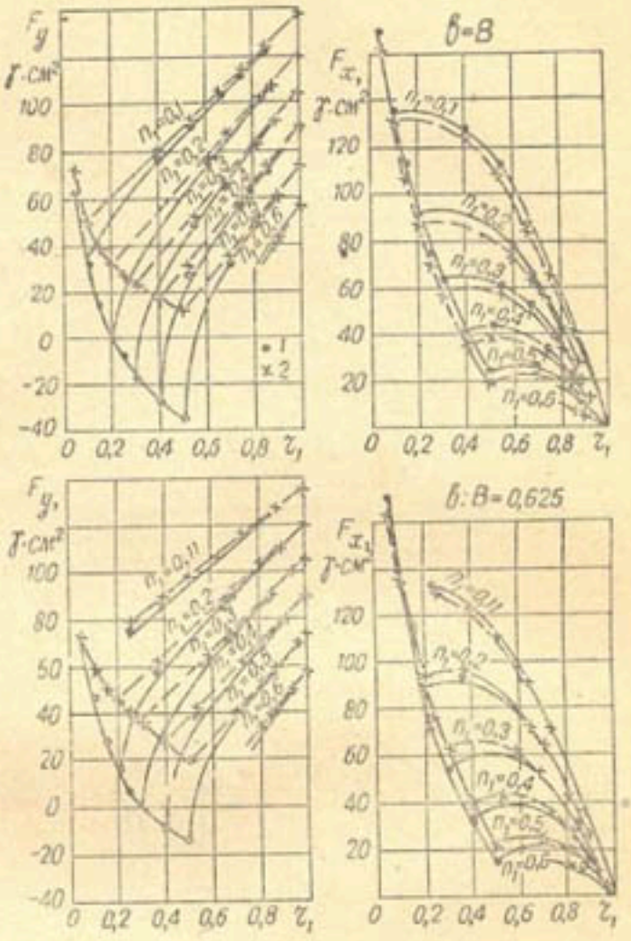


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные значения $F_y = f(n_1, r)$ и $F_x = f_1(n_1, r_1)$ (очертания нижней части обшивки затвора по эллипсу $R_2 = 2R_1 = 0,4\ H = 8$ *см*):
точки: *1* — опытные; *2* — расчетные.

Исследования дали следующие результаты.

1. Для поверхностных затворов с различными очертаниями обшивок гидродинамическая сила давления воды состоит из слагаемых—гидростатического, динамического, подсасывающего действия (вакуум) и центробежной силы, возникающих в движущемся потоке под затвором, что подтверждает исходные положения работы [6].

2. Для одинаковых условий подхода потока $b/B = \text{idem}$, напора верхнего бьефа $H = \text{const}$, открытия и параметров конструкции затвора при затопленном истечении воды из-под него по сравнению со свободным наблюдается (рис. 3,4,5):

а) увеличение подъемной силы F_y с увеличением глубины потока нижнего бьефа затвора непосредственно у обшивки $h_щ$ при затоплении истечения;

б) уменьшение величины силы F_x с увеличением глубины потока $h_щ$ нижнего бьефа.

3. При свободном истечении воды* из-под затвора (для исследованных очертаний, кроме плоского) расчеты расходятся с опытными данными при открытиях $a \geqslant 0{,}15H$ больше чем на 5%, из-за больших перепадов горизонтов воды бьефов, вызывающих в движущемся потоке под затвором подсасывающее действие (вакуум) и центробежные силы, которые не учитываются в формулах автора [4]. Это требует введения поправок в расчетные формулы при свободном истечении воды из-под затвора.

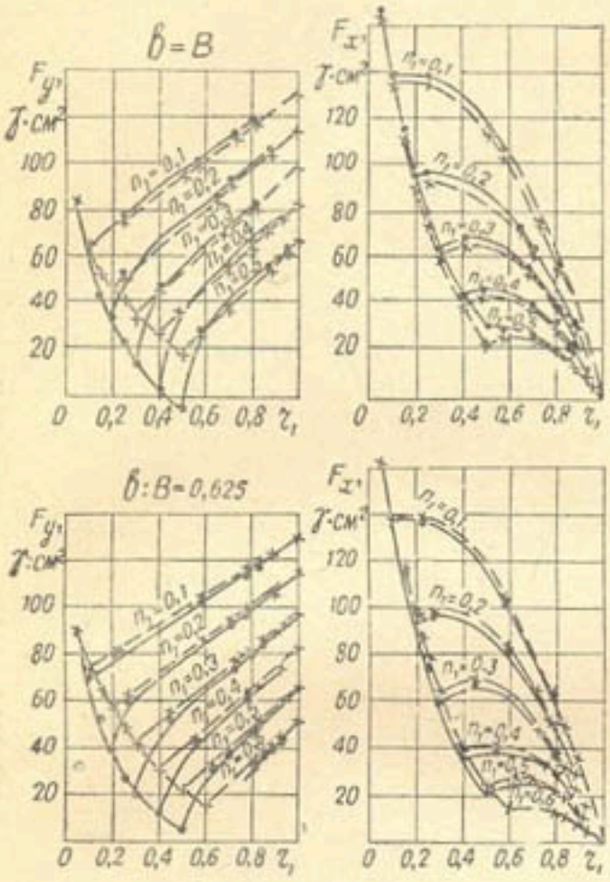


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные значения $F_y = f(n_1, r_1)$ и $F_x = f_1(n_1, r_1)$ (очертания нижней части обшивки затвора по окружности $R_1 = 0{,}4\ H = 8$ *см*):

точки: *1* — опытные; *2* — расчетные.

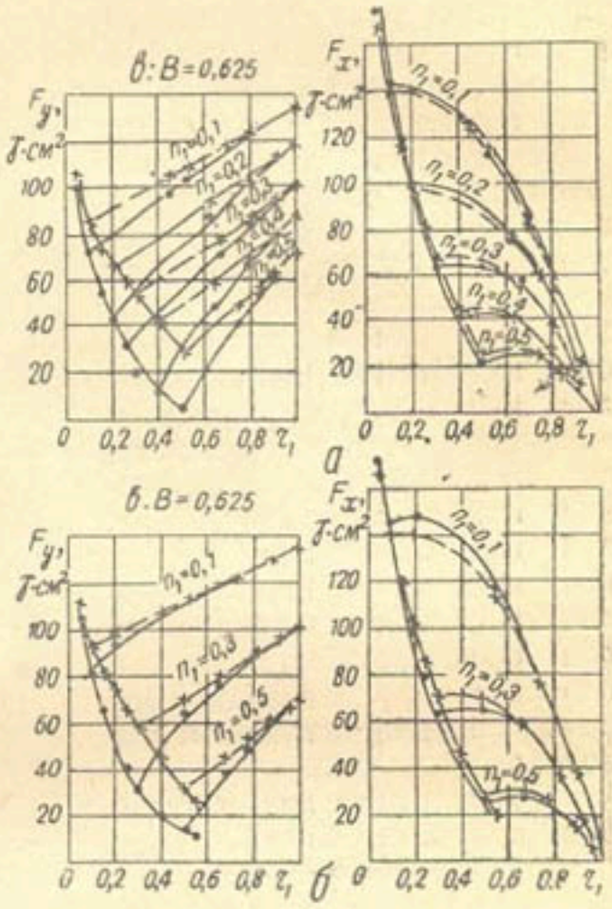


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные значения $F_y = f(n_1, r_1)$ $F_x = f_1(n_1, r_1)$ при очертаниях нижней части затвора по параболе (*а*) и гиперболе (*б*) $R_2 = 2R_1 = 0{,}4\ H = 8$ *см*:

точки: *1* — опытные; *2* — расчетные.

4. Силы давления воды в нижнем бьефе на обшивку затвора с увеличением затопления нижнего бьефа приближаются к силам гидростатического давления.

5. При затопленном истечении воды из-под затвора с очертанием нижней части обшивки по окружности $R > 0{,}2\ H$ и по эллипсу $k_2 = 2$, $R_1 \geqslant 0{,}4\ H$ по расчетным формулам автора [4] для определения сил F_x, F_y получаются расхождения менее $\pm 5\%$ с опытными данными. Результаты расчетов для очертаний по параболе и гиперболе $k_2 = 2$, $R_1 \geqslant 0{,}4\ H$ аналогично расходятся с опытными не более чем на $\pm 5\%$, но погрешность значительнее.

---

*) Характер распределения эпюр давления потока на обшивку затвора с очертанием нижней части по окружности очень близок к характеру опытных эпюр, полученных проф. А. Кохом для вальцовых затворов [2].

Так как затвор-автомат [5] предназначен для работы в условиях малых перепадов, то расчетные формулы [4] применимы для определения гидродинамических сил давления потока F_x, F_y.

6. Давление потока на дно лотка при открытии затвора меньше гидростатического (чем больше перепад, тем больше расхождение). Это необходимо иметь в виду при фильтрационных расчетах гидротехнического сооружения, т. е. определении фильтрационного давления на флютбет сооружения и противодавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынов А. К. Экспериментальная аэродинамика, М., Оборонгиз, 1958.
2. Koch—Carstanjen. Bevegung des Wassers und dabei auftretende Kräfte, Leipzig 1932.
3. Френкель Н. З. Гидравлика, М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.
4. Хамадов И. Б. Гидродинамические силы воздействия потока на автоматический затвор гидравлического действия, регулирующий горизонт верхнего бьефа, Труды САНИИРИ, вып. 107, Ташкент, 1960.
5. Хамадов И. Б. Автоматический затвор гидравлического действия, Бюллетень изобретений, 1960, № 20.
6. Хамадов И. Б. „Изв. АН УзССР", серия техн. наук, 1961, № 2.
7. Хамадов И. Б. Истечение воды из-под затворов с плавно обтекаемыми очертаниями нижней части обшивок или козырьков, публикуется в настоящем сборнике.
8. Хамадов И. Б. Гидродинамические силы потока, действующие на затвор, В сб. „Некоторые вопросы гидравлики, ирригации, горного дела и электроники", АН УзССР, Ташкент, 1961.

А. А. ГАРТУНГ

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ АВТОМАТОВ ВЕРХНЕГО БЬЕФА ТИПА ФИРМЫ НЕЙРПИК

Внедрение автоматизации в практику повседневной работы оросительных систем приобретает в настоящее время исключительно важное значение.

Задача координации ирригационной системы значительно облегчается введением телеуправления, осуществляемого из единого диспетчерского пункта, но полностью решить вопросы правильного регулирования можно только благодаря широкому внедрению автоматики. Однако автоматика, имеющая в своем составе электромеханические элементы привода и управления, требует больших капитальных затрат на изготовление, подводку энергопитания, штат высококвалифицированных работников обслуживания и при тщательном экономическом анализе может оказаться невыгодной, а во многих случаях и практически неосуществимой.

Вопросы авторегулирования расходов и горизонтов в каналах могут решаться значительно проще в случае применения гидравлических (вододействующих) автоматов, т. е. таких устройств, которые не требуют для своей работы посторонней энергии, а используют энергию потока воды, протекающей через данное сооружение.

Так, в случае применения автоматов горизонта верхнего бьефа на перегораживающих сооружениях системы может осуществляться независимая работа каждого узла, отпадает необходимость в постоянной регулировке щитовых отверстий, изменение транзитного расхода не приведет к расстройству работы нижележащих узлов.

Таким образом, количество нарушений графика водоподачи в отводы может быть сведено к минимуму, а работа оросительной системы будет иметь более четкий характер.

Применение гидравлических автоматов даст большую экономию средств на эксплуатацию и содержание, позволит точно и автоматично регулировать расходы и горизонты воды в каналах.

Кроме этого, подобные сооружения, как правило, обладают водомерностью и дают возможность применения простых схем телемеханического контроля.

В Советском Союзе система регулирования при помощи гидравлических автоматов горизонта верхнего бьефа используется на правобережном канале Верхнезеравшанского узла. Этот канал имеет протяжение в 25 *км* и распределяет до 120 $м^3/сек$ между пятью районами Самаркандской области. Распределение воды совершается при помощи пяти узлов, имеющих перегораживающие сооружения с перепадами

от 1,5 до 3 *м*, головные регуляторы для распределителей и два катастрофических сброса.

По предложению инженера М. Ф. Финке на перегораживающих сооружениях были установлены затворы для автоматического регулирования и поддержания заданного командного горизонта в верхнем бьефе. Конструкция этих затворов весьма простая. Для их работы используется энергия воды, протекающей через сооружение.

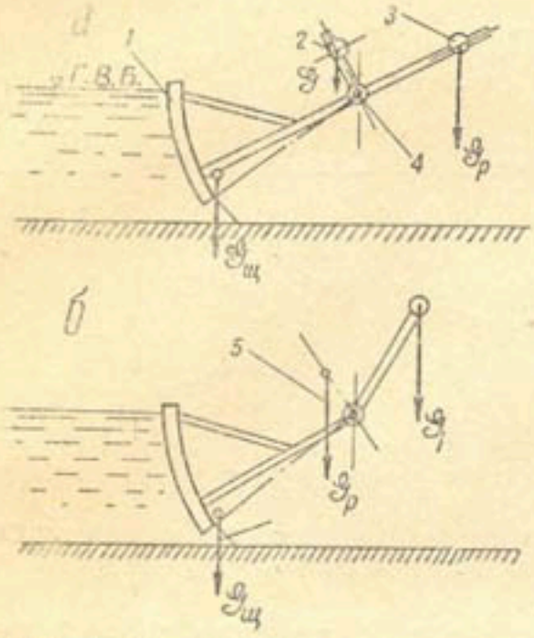


Рис. 1. Схема затвора типа фирмы Нейрпик:

а: *1* — поплавок; *2* — установочный груз; *3* — противовес; *4* — ось вращения; *б*: *5* — равнодействующая веса конструкции; *6* — вес щита, ноги, поплавка.

Реконструкция узлов потребовала сравнительно небольших капитальных затрат, а в результате получена система регулирования, практически полностью оправдавшая себя.

В этой связи заслуживает внимания и тщательного изучения опыт работы ирригационных систем Алжира и Марокко, построенных из бетонных лотков и оснащенных автоматическими устройствами фирмы Нейрпик, регулирующими горизонты воды в канале. Но, к сожалению, о качестве и совершенстве работы этих автоматов мы имеем весьма скудные сведения и главным образом рекламного характера. Поэтому в гидрометрической лаборатории Института водных проблем и гидротехники АН УзССР были проведены лабораторные исследования моделей автомата верхнего бьефа типа фирмы Нейрпик с параболическим и прямоугольным очертанием щитового лотка.

Конструкция автомата и принцип его действия. Автомат верхнего бьефа представляет собой сегментный затвор, вес которого частично уравновешивается противовесом (рис. 1). На лобовой стенке щита укреплен поплавок, создающий выталкивающий момент, величина которого меняется при изменении регулируемого горизонта перед затвором.

Наружная поверхность стенки щита и поплавка выполнена по радиусу, очерченному из центра оси вращения.

Процесс поддержания заданного горизонта перед щитом заключается в уравновешивании выталкивающих моментов от действия поплавка моментами от груза противовеса, помещенного на коромысле.

Равенство моментов от поплавка и противовеса должно сохраняться только при одном заданном значении горизонта верхнего бьефа, при изменении его равенство моментов нарушается и щит начинает перемещаться до тех пор, пока опять не восстановится равновесие, т. е. пока перед щитом не установится регулируемый горизонт. Величина угла открытия щита будет зависеть от расхода, проходящего через подщитовое отверстие. При перемещениях щита за счет изменения высоты подщитового отверстия, а следовательно и пропускаемого расхода, регулируемый горизонт восстанавливает свою первоначальную отметку.

Принципиально осуществить уравновешивание выталкивающих моментов, создаваемых поплавком, можно двумя способами.

По первому способу (рис. 1*а*) вес щита и металлоконструкций полностью уравновешивается противовесом, укрепленным на противоположных концах ног, а на оси вращения щита, на определенном расстоянии от центра вращения, укрепляется дополнительный груз, вес которого и угол наклона подбираются таким образом, чтобы этот груз мог уравновесить выталкивающий момент поплавка при заданном горизонте верхнего бьефа.

По второму способу (рис. 1 *б*) размер противовеса, его плечо и угол наклона подбираются так, чтобы общий центр тяжести системы затвор — противовес находился над осью вращения щита, а его координаты и величина удовлетворяли условию уравновешивания моментов от поплавка.

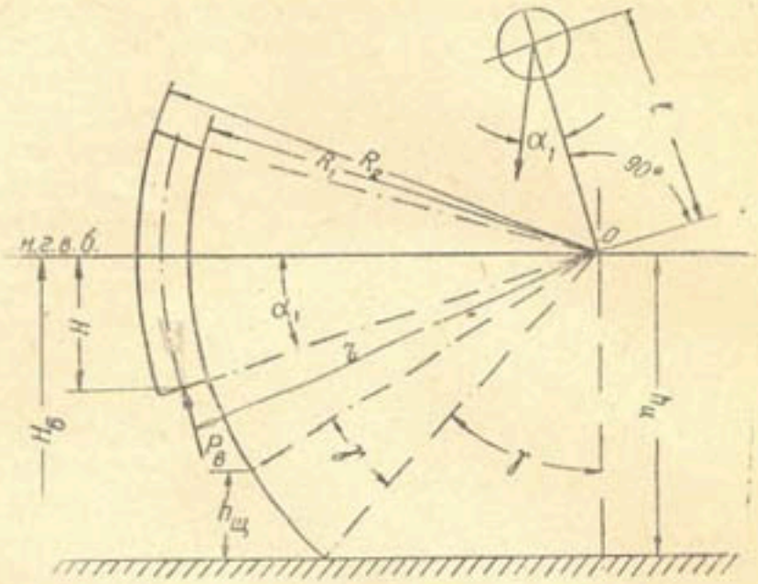


Рис. 2. Схема для расчета статических выталкивающих моментов поплавка.

Первый вариант с дополнительным грузом, на наш взгляд, является более предпочтительным, так как дает возможность получить более простое конструктивное решение устройства для перерегулирования автомата на работу с другими горизонтами верхнего бьефа, которые могли бы потребоваться в процессе эксплуатации. Осуществлять такую регулировку, как показали опыты, можно в широких пределах.

О статическом расчете гидравлических автоматов с поплавком на лобовой стенке щита. В случае, если обшивка сегментного затвора и поплавка очерчена по радиусу, центр которого проходит через ось вращения щита, силы гидростатического давления воды, приложенные к обшивке щита и поплавка, не дают никакого момента, поворачивающего затвор вокруг шарнира. Отсюда следует, что гидростатическая или, иначе, выталкивающая сила может возникуть только за счет нижней плоскости поплавка (рис. 2).

Выталкивающую силу поплавка найдем из уравнения

$$P_v = \int_{R_1}^{R_2} \gamma \cdot b \cdot H \cdot \cancel{k} \cdot dr = \int_{R_1}^{R_2} b \cdot r \cdot \sin \alpha_1 \, dr \cdot \gamma = b \cdot \sin \alpha_1 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2}, \quad (1)$$

где b — ширина поплавка.

Тогда момент от выталкивающей силы поплавка будет

$$M_1 = \int_{R_1}^{R_2} \gamma \cdot b \cdot H \cdot r \cdot dr = \int_{R_1}^{R_2} \gamma \cdot b \cdot r^2 \cdot \sin \alpha_1 \cdot dr = \gamma \cdot b \cdot \sin \alpha_1 \frac{R_2^3 - R_1^3}{3}. \quad (2)$$

Выталкивающий момент поплавка уравновешивается моментом от контргруза или противовесом, у которого общий центр тяжести системы

находится над осью вращения, а его величина и координаты удовлетворяют задаче уравновешивания моментов от поплавка.

Уравновешивание моментов можно выполнить при условии, если общий центр тяжести дополнительного груза или же системы затвор—противовес лежит на прямой, перпендикулярной к линии, соединяющей низ поплавка с осью вращения, а горизонт воды верхнего бьефа находится на уровне оси вращения щита.

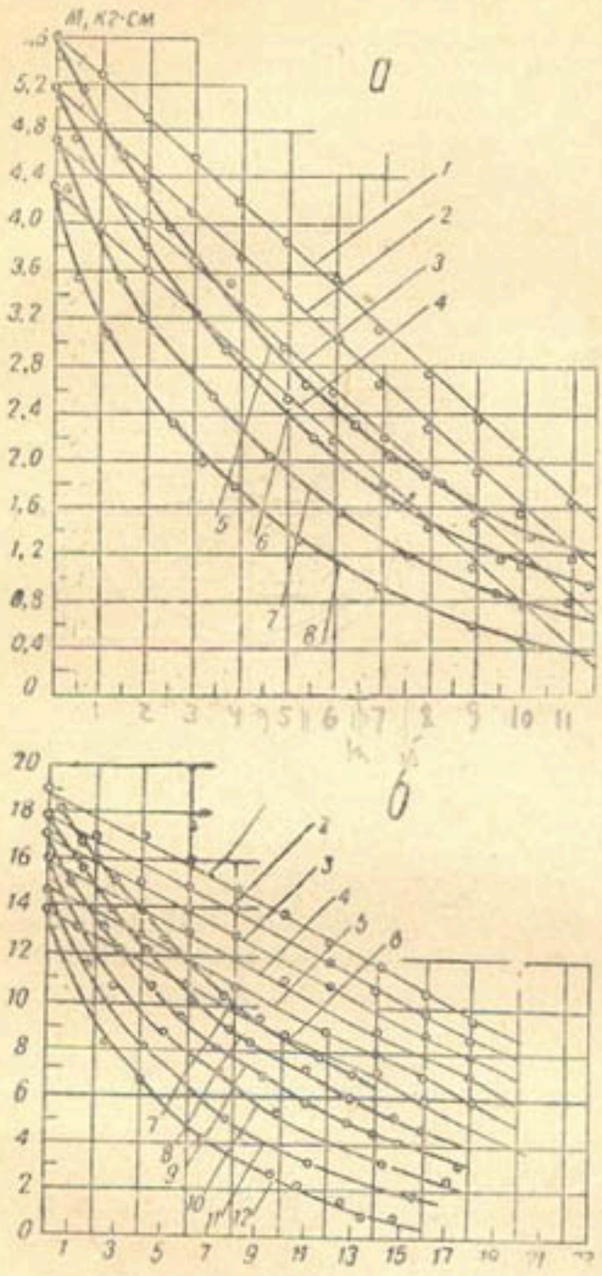


Рис. 3. Кривые изменения статических и динамических выталкивающих моментов для прямоугольного (*а*) и параболического (*б*) лотков:

а: $M_{ст}$ $H_в$ =*1*—146; *2*—136; *3*—126; *4*—116; $M_д$ $H_в$ = =*5*—146; *6*—136; *7*—126; *8*—116. *б*: $M_{ст}$ $H_в$ = *1*—230; *2*—220; *3*—210; *4* 200; *5*—190; *6* 180; $M_д$ $H_в$ = =*7*—230, *8*—220; *9* 210; *10*—200; *11*—190; *12*—180.

Тогда

$$M_2 = G \cdot l \cdot \sin \alpha_1. \qquad (3)$$

Для работы автомата необходимо условие равенства моментов

$$M_1 = M_2$$

или

$$G \cdot l \cdot \sin \alpha_1 = \gamma \cdot b \cdot \sin \alpha_1 \frac{R_2^3 - R_1^3}{3}.$$

Отсюда, зная вес, найдем плечо, на котором должен располагаться контргруз или центр тяжести системы затвор — противовес

$$l = \frac{\gamma \cdot b}{G} \cdot \frac{R_2^3 - R_1^3}{3}. \qquad (4)$$

Таким образом, как выталкивающие, так и уравновешивающие моменты изменяют свою величину по закону синуса, сохраняя равенство между собой. Следовательно, при расчетном горизонте затвор должен находиться в равновесии при любом открытии.

На рис. 3 тонкими линиями нанесены кривые изменения статических выталкивающих моментов, подсчитанных по формуле (2) для моделей с прямоугольным и параболическим очертанием щитового лотка.

Содержание исследований. Основной задачей исследований являлось выяснение закона изменения выталкивающих моментов поплавка, укрепленного на лобовой стенке сегментного щита при различных расходах и горизонтах воды верхнего бьефа, а также способности автомата поддерживать заданный горизонт воды при изменениях расхода, проходящего через модель.

Испытывали две модели автомата, выполненные в САНИИРИ в масштабе 1/5 и 1/10 натуры.

Первая модель с прямоугольной формой щитового лотка размером 240×150 *мм* рассчитана на пропуск до 10 *л/сек*, вторая — с формой лотка, приближающейся к параболической (рис. 4), пропускала до 25 *л/сек*. Модели устанавливали в отсеках малого стенда по нивелиру с нулевым уклоном. Горизонты перед щитом во время опытов замеряли пьезометрами, у которых начало отсчета на шкале приводили нивелировкой к отметке дна лотка.

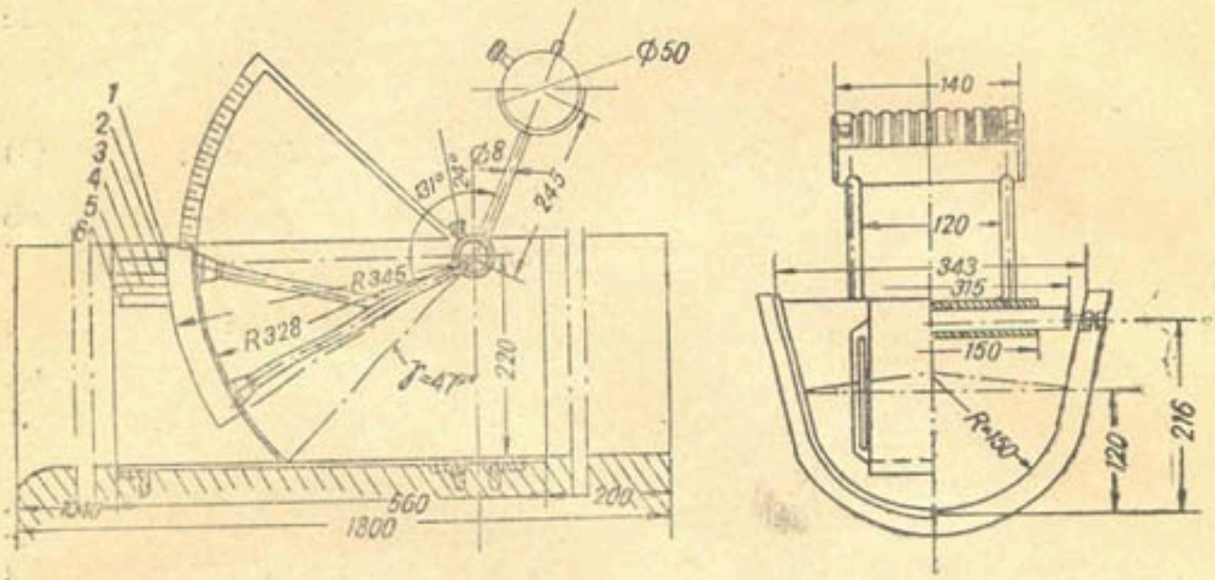


Рис. 4. Конструктивная схема опытной модели затвора-автомата с параболическим лотком:

$H_в$ = 1—230; 2—220; 3—210; 4—200; 5—190 ; 6—180.

Расходы, пропускаемые через щитовое отверстие, замеряли с помощью тарированного мерника через 1—2° угла поворота щита для каждой отметки горизонта верхнего бьефа, а фиксировали их по показаниям наклонного пьезометра; затем по тарировочной кривой мерника находили расходы в литрах в секунду.

Для проверки возможности установки автомата на поддержание других горизонтов в опытах приняты шесть отметок горизонта верхнего бьефа для модели автомата с параболическим лотком и четыре для автомата с прямоугольным лотком.

Отношение высоты верхнего бьефа $H_в$ к высоте центра оси вращения щита от дна лотка $h_ц$ принято равным

$$\frac{H_в}{h_ц} = 1{,}05 \div 0{,}80.$$

Уравновешивание затвора с учетом сил динамики. Для проверки возможности применения статического метода определения выталкивающих моментов были проделаны опыты по определению действительного характера изменений величин выталкивающих моментов в условиях обтекания плоскости поплавка потоком воды. Значение выталкивающих моментов поплавка замеряли в процессе опытов весовым способом.

Процесс замера заключался в следующем: на верхней кромке щита, полностью сбалансированного перед началом опытов, помещали чашку, в которую засыпали дробь. Регулируя расход воды задвижкой, устанавливали заданный горизонт перед щитом. Затем, после необ-

ходимой выдержки, снимали угол открытия щита по лимбу, имеющему деления в градусах, и расход воды по показаниям мерника.

Действительный выталкивающий момент подсчитывали по формуле

$$M_в = l \cdot \cos(\alpha + \beta) G. \qquad (5)$$

Здесь $M_в$ — выталкивающий момент поплавка;

l — расстояние от центра тяжести чашки с дробью до оси вращения щита;

α — угол поворота щита, *град;*

β — угол между горизонталью и центром тяжести дроби в чашке, *град.*

На рис. 3 приведены кривые изменения динамических выталкивающих моментов для разных горизонтов.

Сравнивая значения выталкивающих моментов, полученных путем статического расчета и в результате опытов, необходимо отметить, что динамические выталкивающие моменты по своей величине значительно меньше статических. Эта разница достигает своего максимума на средних углах открытия щита порядка 10—12°. В начальном положении, когда сегментный щит еще полностью закрыт, статический момент достигает своего максимума, совпадающего с максимумом динамического момента при малом значении угла открытия.

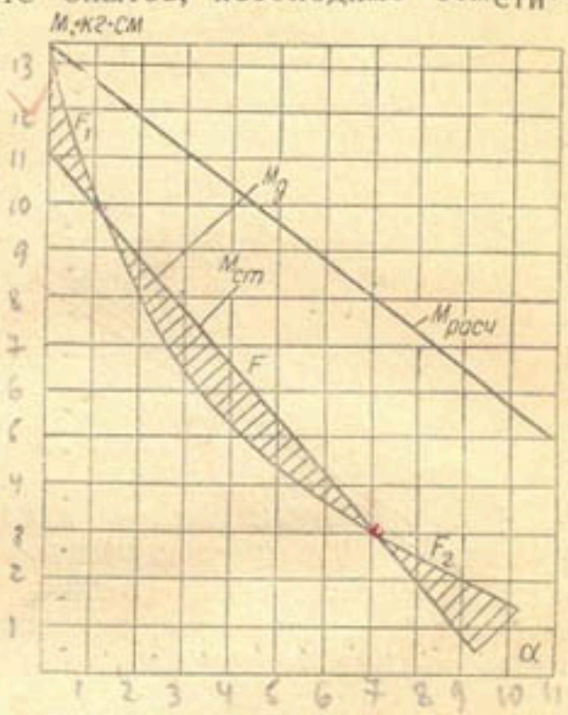


Рис. 5. Схема к определению координат расположения контргруза.

Таким образом, следует сделать вывод, что применение одного статического метода расчета, без учета сил динамики, не может дать положительного результата при расчете автомата на поддержание определенного горизонта. Как показали опыты, силы подсоса, действующие на нижнюю плоскость поплавка и частично на кромку щита, значительны, и без их учета применение только статического метода расчета даст большие погрешности при регулировании.

Получить точное поддержание заданного горизонта мы могли бы только в том случае, если кривая уравновешивающих моментов могла бы постоянно следовать закону изменений динамических моментов. Так как это невозможно без изменения конструктивной схемы автомата и введения дополнительных устройств (лекало), расчет автомата следует производить по фактической кривой моментов.

Для получения минимально возможной величины погрешности в поддержании заданного горизонта на всем диапазоне работы автомата необходимо, чтобы изменение уравновешивающих статических моментов следовало по линии *11* (рис. 5), а площадь F (заштрихованная на чертеже) равнялась примерно сумме площадей F_1 и F_2

$$F = F_1 + F_2. \qquad (6)$$

Для этого случая угол установки контргруза α_1 мы получим, решив

уравнение

$$\frac{\sin(\alpha - \alpha_1)}{\sin(\alpha - \alpha_2)} = \frac{M_1}{M_2}, \qquad (7)$$

где M_1 и M_2 — фактические выталкивающие моменты поплавка при углах открытия щита α_1 и α_2, найденные опытным путем.

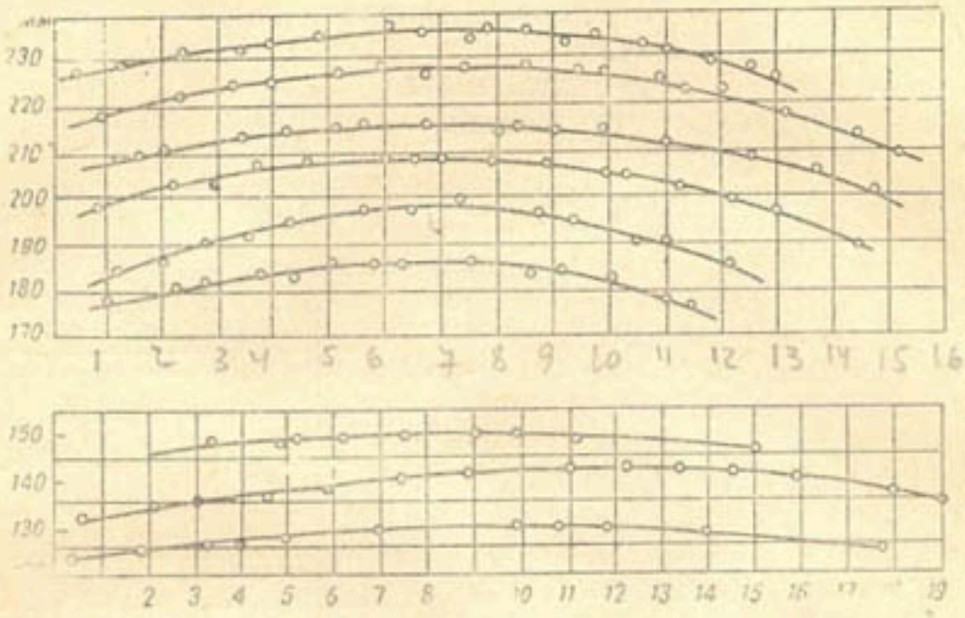


Рис. 6. Кривые изменения горизонтов верхнего бьефа для параболического (*а*) и прямоугольного (*б*) лотков:
а: $H_в = f(\alpha^0)$ для $H_в = 230$; 220; 210; 200; 190; 180 *мм*;
б: $H_в = f(\alpha^0)$ для $H_в = 146$; 136; 126 *мм*.

Проверка способности автомата сохранять заданный горизонт верхнего бьефа при изменениях транзитного расхода. Для проверки и выявления величин погрешностей, возникающих в процессе работы автоматических затворов вернего бьефа, были проделаны опыты над действующими моделями, установленными в отсеках малого стенда гидрометрической лаборатории. С целью получения минимально возможных погрешностей угол установки противовеса, его вес и размер плеча определяли по формуле (7) после нахождения фактической кривой изменения динамических выталкивающих моментов поплавка. По данным опытов построены графики $H_в = f(\alpha^0)$ изменения горизонтов верхнего бьефа в функции углов открытия щита и транзитных расходов, пропускавшихся во время опытов (рис. 6).

Из графиков видно, что отклонения от расчетного горизонта верхнего бьефа при изменениях пропускаемых расходов имеются. Открытие щита происходит не при заданном горизонте верхнего бьефа, а при меньшем, достигая заданного при угле поворота щита, равном 2°, принятом при вычислении веса и координат расположения контргруза. При дальнейшем увеличении транзитного расхода горизонт также растет, достигая максимального значения при средних углах открытия щита, а затем падает до расчетного и ниже.

Такие колебания поддерживаемого горизонта являются совершенно закономерными в связи с тем, что при малых углах открытия щита динамические выталкивающие моменты превышают моменты от контргруза, а поэтому щит открывается на угол больше требуемого, вследствие чего горизонт меньше заданного. Горизонт устанавливается

на заданной отметке, когда наступает равенство динамических выталкивающих моментов от поплавка и моментов контргруза. В расчетах по графикам $M_д = f(\alpha^0)$ принимались значения динамических выталкивающих моментов при углах открытия щита $\alpha = 2°$ и $11°$.

При дальнейшем увеличении подаваемых расходов моменты от контргруза становятся больше выталкивающих моментов от поплавка, а поэтому горизонт верхнего бьефа растет. Вторично он достигает заданного при открытии щита на угол 11°, что также соответствует принятому диапазону работы моделей щита-автомата. При тщательной балансировке модели, точной установке угла и размеров контргруза и отсутствии трения максимальные отклонения горизонта верхнего бьефа от расчетного составляли 5—7%.

ВЫВОДЫ

1. Исследованную конструкцию гидравлического автомата можно применить на каналах в качестве перегораживающего сооружения если не требовать особой точности в поддержании горизонта (до 5—7%) и диапазоне изменений открытия щита от 2° до 10—12° в комплексе с автоматами расходов на отводах, как это и делается фирмой Нейрпик.

2. Конструкция щитов-автоматов, предназначенных для пропуска больших расходов и работающих на больших углах открытия, необходимо в обязательном порядке снабжать упорами, препятствующими опрокидыванию щита, и демпфером, гасящим его колебания, вызванные волнениями в канале, наличием срывных сил подсоса на нижней плоскости поплавка или при резких изменениях транзитного расхода.

3. Максимальный угол открытия исследованных лотковых автоматов (из условия устойчивой работы) не должен превышать 12—14°.

4. В связи с возможностью возникновения волн, отраженных от стенок и откосов канала, приводящих к раскачке щита, следует избегать установки щита-автомата на крутых поворотах канала и боковых отводах, не имеющих достаточной протяженности.

5. Основной недостаток подобной конструкции — уменьшение пропускной способности сооружения в связи с неполным открытием подщитового отверстия. Наличие поплавка в зоне динамического воздействия потока воды приводит к искажению характера изменений выталкивающих моментов. Статический метод расчета подобных автоматов без учета фактора динамического воздействия потока воды на поплавок, во избежание грубых погрешностей в поддержании заданной отметки горизонта, применять нельзя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пеплов Э. Э. „Гидротехника и мелиорация", 1958, № 9.
2. International Comission on Irrigation and Drinage. Annual. Bulletin, 1955.
3. Lewis M. R. Civil engineering, March, 1956.
4. Third. Congress on Irrigation and Drainage, Report for Discussion San, Francisco, 1957.

А. Г. ЕРЕМЕНКОВ

ШНУРОВЫЕ ВОДОПОДЪЕМНИКИ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ИЗ СКВАЖИН НА ПАСТБИЩАХ ОТГОННОГО ЖИВОТНОВОДСТВА

В последнее время на пастбищах, наряду со строительством шахтных колодцев, производится бурение большого количества скважин с целью водоснабжения и разведки грунтовых вод. Полная механизация строительства скважин значительно ускоряет темпы обводнения новых пастбищных территорий.

Однако большинство несамоизливающихся разведочных скважин в настоящее время не эксплуатируется из-за отсутствия водоподъемных агрегатов, удовлетворяющих условиям работы на пастбищах пустынь. Оборудование для подъема воды из скважин, успешно применяющееся в населенных пунктах и землях культурной зоны, не получило распространения на пастбищах из-за неприспособленности его к тяжелым условиям эксплуатации в пустыне.

Сезонность использования пустынных пастбищных угодий и необходимость перегонов скота требуют применения установок передвижного или полустационарного типа. Техническая неподготовленность чабанов, разбросанность водоисточников на громадной территории и отдаленность их от ремонтных баз обусловливают потребность в простейших водоподъемных механизмах, способных работать без квалифицированного технического надзора. Отсутствие электроэнергии и малые диаметры обсадных труб скважин (5"—8") еще более ограничивают возможность выбора водоподъемных механизмов.

Опыт эксплуатации ленточных водоподъемников марки Л-100 и ЭЛ-100 САНИИРИ в пустынях Средней Азии показывает, что условиям водоснабжения пастбищ в пустыне наиболее полно удовлетворяют водоподъемники типа шнуровых. Однако шнуровые водоподъемники с открытым шнуром, изготовленные по подобию ленточных, не могут быть использованы для подъема воды из скважин малого диаметра, так как значительное уменьшение ширины водоподъемной ленты обусловливает конструкцию водоподъемника с низкой производительностью. Стремление повысить производительность при сохранении основного принципа действия шнуровых насосов приводит к конструктивной схеме шнурового водоподъемника с направляющей трубой, который был предложен Н. Е. Жуковским [3].

Шнуровой водоподъемник с направляющей трубой представляет собой установку (рис. 1), состоящую из бесконечной ленты *1*, охватывающей верхний ведущий *2* и нижний *3* направляющие ролики. Восходящая ветвь ленты заключена в направляющую (водоподъемную) трубу *4*. Нижний ролик, предназначенный для натяжения лен-

ты, и нижний конец водоподъемной трубы погружены в жидкость. При достижении определенной скорости движения ленты направляющая труба заполняется движущейся вверх жидкостью, которая затем изливается в корпус водоподъемника. Движение воды вверх в направляющей трубе происходит вследствие трения ленты о воду и внутрижидкостного трения.

Простота кинематической схемы и конструкции этого водоподъемника позволяет обслуживать его людьми без особых технических навыков. Расположение основных силовых узлов и трущихся деталей водоподъемника на поверхности земли упрощает обслуживание и ремонт установок.

Водоподъемник может приводиться в действие двигателем внутреннего сгорания или электродвигателем обычного исполнения, чем выгодно отличается от погружных электронасосов. Небольшой вес агрегата, укомплектованного двигателем внутреннего сгорания, позволяет изготавливать установки полустационарного типа, что особенно важно в условиях их эксплуатации на пастбищах отгонного животноводства.

Учитывая перспективность использования шнурового водоподъемника с направляющей трубой для водоснабжения из скважин на пастбищах, мы провели опытные исследования модели в лаборатории гидравлических машин Института водных проблем и гидротехники [2].

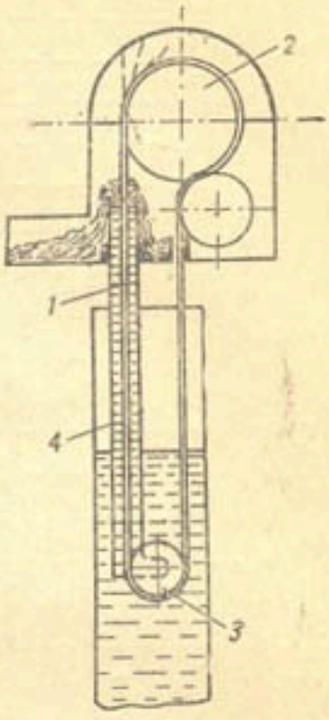


Рис. 1. Схема шнурового водоподъемника с направляющей трубой.

Водоподъемник испытывали с направляющими трубами и рабочими органами различных размеров и форм поперечного сечения. Эти опыты дали возможность определить наиболее приемлемые конструктивные параметры указанных установок.

Рабочим органом служил плоский прорезиненный ремень сечением 32×11 *мм*. Диаметр водоподъемных труб принят равным 1 $^1/_2$". Плоская форма поперечного сечения рабочего органа и сравнительно небольшой диаметр водоподъемных труб позволили уменьшить габариты подземной части водоподъемника и применить его для подъема воды из скважин с малым (5 дюймов) внутренним диаметром обсадных труб.

На основании результатов лабораторных исследований был спроектирован и изготовлен опытный образец водоподъемника с направляющей трубой диаметром 1,5 дюйма. Рабочий орган водоподъемника — прорезиненный ремень с повышенной шероховатостью за счет поперечных канавок глубиной 1,5 *мм*, нанесенных на его поверхность. Размеры поперечного сечения ремня — 32×11 *мм*.

Водоподъемник испытывали на стенде-скважине с внутренним диаметром обсадных труб 5 дюймов. Высота подъема — 38,0 *м*. Величина заглубления колонны направляющих труб под динамический уровень воды в скважине $h = 2{,}4$ *м*.

Полученная в результате испытаний характеристика водоподъемника показана на рис. 2. Из графика (рис. 2) видно, что наибольшая величина к. п. д. водоподъемника составляет 17%, т. е. одного порядка с к. п. д. эрлифтов, установок с водоструйными и вихревыми насосами. При этом изменение скорости движения рабочего органа от

6 до 8 *м/сек* изменяет производительность водоподъемника от 1,5 до 3 *л/сек*. Это вполне достаточно для нормального снабжения водой овец на выпасном участке от одного водоисточника.

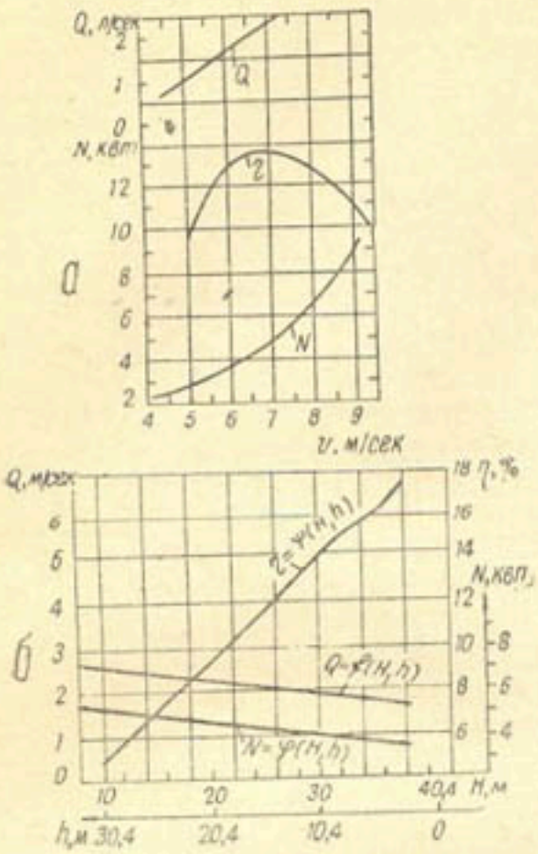


Рис. 2. Характеристика водоподъемника:

а — при различных скоростях движения рабочего органа: $H = 32{,}0$ *м*, $h = 2{,}4$ *м*; *б* — при различных высотах подъема воды и величинах заглубления: $H + h = 40{,}4$ *м*, $v = 6$ *м/сек*.

Для выявления зависимости производительности водоподъемника и потребляемой им мощности от высоты подъема и заглубления колонны направляющих труб под динамический уровень воды мы поставили серию опытов на скважине. При испытаниях водоподъемник устанавливали последовательно с колоннами направляющих труб длиной 40,4; 33,54; 27,4; 20,53; 13,4 и 6,7 *м*.

Высоту подъема воды изменяли от наибольшей ее величины, возможной при данной длине колонны направляющих труб, до высоты, равной 1,5 *м*. При этом заглубление нижнего конца направляющей трубы под динамический уровень воды в колодце соответственно увеличивалось от минимальной до ее максимальной величины.

Опыты производили при различных скоростях движения рабочего органа в диапазоне от 4 до 9 *м/сек*. При этом замеряли производительность водоподъемника и потребляемую им мощность. В результате мы получили ряд характеристик, аналогичных характеристике рис. 2*а*, для каждой длины L колонн направляющих труб при различных высотах подъема H и величинах заглубления h.

На основе этих данных был построен график (рис. 2*б*) зависимости производительности водоподъемника, потребляемой им мощности и к. п. д. от высоты подъема H и заглубления h. Длина колонны направляющих труб $L = 40{,}4$ *м*, скорость движения рабочего органа 6 *м/сек*.

Из графика рис. 2*б* видно, что эти зависимости выражаются в виде прямых линий. Производительность увеличивается с возрастанием величины заглубления колонны направляющих труб под динамический уровень воды в колодце. Но с увеличением заглубления соответственно растут потери энергии при прохождении холостой ветви рабочего органа сквозь столб воды в колодце. Как видно из графика рис. 2*б*, в совокупности это приводит к увеличению потребляемой водоподъёмником мощности и снижению его к. п. д. Поэтому работа водоподъемника выгоднее при наименьшем заглублении. Однако при заглублении менее 2 *м* наблюдается аэрация потока воды в трубах вследствие того, что воздух, увлеченный рабочим органом, не успевает рассеяться в толще воды и проникает в направляющую трубу. Рекомендуемое нами заглубление колонны направляющих труб под динамический уровень в колодце равно 2—3 *м*.

Из сводного графика (рис. 3) зависимости производительности от величины подъема H и заглубления h для водоподъемника с колоннами труб L длиной 6,7; 13,4; 20,53; 27,4; 33,54 *м* при скоростях движения рабочего органа $v = 5$ *м/сек* и $v = 8$ *м/сек* видно, что прямые линии $Q = f(H,h)$ при $v = \text{const}$ для водоподъемника с различными длинами колонн направляющих труб практически сходятся в одной точке.

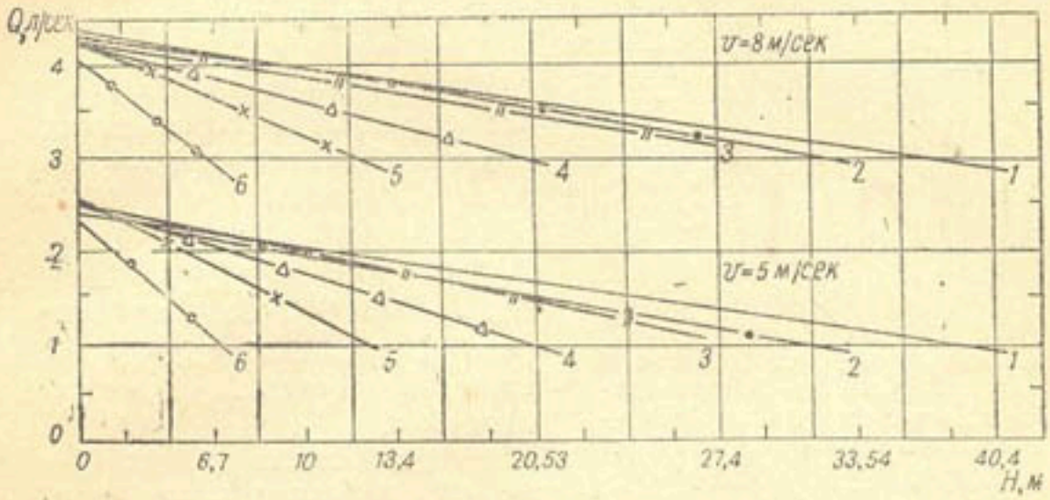


Рис. 3. Зависимость производительности от высоты подъема воды и заглубления для различных длин колонн направляющих труб водоподъемника:

длина колонны (*м*): *1*—40,4; *2*—33,5, *3*—27,4, *4*—20,53; *5*—13,4; *6*—6,7.

На графике можно заметить, что при заглублении, приближающемся к минимальному, производительность для различных длин колонн направляющих труб остается постоянной и не зависит от высоты подъема воды. Этот результат подтверждает теоретические проработки акад. Л. С. Лейбензона [4] о независимости производительности шнуровых водоподъемников от высоты подъема жидкости.

В общем виде зависимость производительности от соотношения заглубления к длине колонны направляющих труб можно выразить формулой

$$Q = Q_{h_{\min}} + K \cdot \frac{h}{L},$$

причем

$$K = Q_{H=0} - Q_{h_{\min}},$$

где Q — производительность водоподъемника, *л/сек*;

h — заглубление колонны направляющих труб под динамический уровень воды в колодце, *м*;

L — длина колонны направляющих труб, *м*;

$Q_{H=0}$ — производительность (*л/сек*) при высоте подъема воды, равной нулю, т. е. при максимальном заглублении труб;

$Q_{h_{\min}}$ — производительность водоподъемника (*л/сек*) при минимальном заглублении труб.

Как видно из графика рис. 3, величины $Q_{H=0}$ и $Q_{h_{\min}}$ практически не зависят от длины колонны направляющих труб и для данных

конструкций направляющих труб и рабочего органа остаются постоянными (при условии $v = \text{const}$).

В пределах оптимального режима (к. п. д. 16—18%) производительность водоподъемника можно регулировать изменением скорости движения рабочего органа. Наибольшая производительность водоподъемника при заданной номинальной мощности двигателя будет зависеть от характеристики скважины, т. е. положения статистического уровня воды в ней и ее удельного дебита.

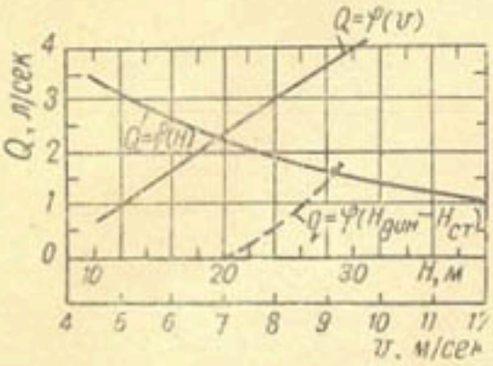


Рис. 4. Определение высоты подъема воды и режима работы водоподъемника в зависимости от характеристики скважины $q = \varphi(H_{дин} - H_{ст})$; $N = 3{,}7$ *л. с.*; $h_з = 3$ *см.*

На рис. 4 приведен график зависимости производительности водоподъемника от высоты подъема воды при постоянной потребляемой им мощности $Q = f(H)$ и характеристика скважин $q = f(H_{дин} - H_{ст})$. Заглубление направляющих труб под динамический уровень воды в скважине принято равным 2 *м*.

Пересечение кривых на графике определяет рабочую точку. По рабочей точке можно найти длину L колонны направляющих труб

$$L = H + h_з,$$

где $h_з$ — рекомендуемое заглубление 2—3 *м*, и определить производительность водоподъемника Q *л/сек*. Скорость движения рабочего органа при указанных условиях можно определить по прямой, нанесенной на график (рис. 4) зависимости производительности водоподъемника от скорости движения рабочего органа.

На основании результатов испытаний и обследования скважин в пустынно-пастбищной зоне в лаборатории гидромашин Института водных проблем и гидротехники под руководством автора были разработаны чертежи водоподъемника марки 5СВ в двух вариантах.

Варианты водоподъемников отличаются друг от друга конструктивным исполнением устройства для натяжения рабочего органа.

Технические параметры водоподъемника 5СВ: диаметр обсадных труб скважин — 5″; производительность 1,5 + 2,5 *л/сек*; высота подъема воды — 30 *м*; рабочий орган — плоская прорезиненная лента; диаметр направляющих труб — 1,5″; привод — от двигателя внутреннего сгорания ЗИД-4,5.

Сравнительные испытания двух конструктивных вариантов опытных установок, проведенные на скважинах в Ферганской области, позволили выявить основные эксплуатационные недостатки и выбрать рациональную конструкцию водоподъемника, приемлемого для водоснабжения на пастбищах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евтихиев Б. Е. Изв. АН БССР, 1950, № 3.
2. Еременков А. Г. К вопросу механизации водоснабжения из скважин на пастбищах в пустынных районах Средней Азии, Труды САНИИРИ, № 102, Ташкент, 1959.
3. Жуковский Н. Е. „О трении жидкости при большой разности скоростей ее струй", Собр. соч., т. 3., М.—Л., 1937.
4. Лейбензон Л. С. К теории шнуровых насосов, Собр. трудов, т. 3, М. АН СССР, 1955.
5. Лаврентьев А. И. Экспериментальные исследования шнурового водоподъемника, В „Сборнике научно-технических работ Московского института механизации и электрификации", М., 1952.
6. Машков В. Н. Исследование ленточных водоподъемников и некоторые вопросы их эксплуатации на шахтных колодцах в пустынях Средней Азии, Автореферат канд. дисс., Ташкент, 1958.
7. Соколов Б. И. Обводнение пастбищ пустынь, Ташкент, 1958.

Б. И. МИНКЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ВИБРИРОВАНИЯ И РАЗЛИЧНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА КАЧЕСТВО ПЛАСТОБЕТОНА НА МОНОМЕРЕ ФА

Достижения химической науки и промышленности последних лет дают возможность широко внедрять синтетические материалы во многие отрасли народного хозяйства, в том числе и в строительство.

Использование полимеров позволит повысить технику строительства, снизить себестоимость и улучшить качество многих видов строительных материалов и изделий. Так, большую роль в строительстве может сыграть применение нового вида бетона — пластобетона, для которого в качестве вяжущего берется фурфурольно-ацетоновая смола ФА, разработанная Московским институтом пластмасс (НИИПМ). Пластобетон обладает большой механической прочностью (прочность на сжатие пластобетона, приготовленного на речном гравии и песке, равна 400—450 *кг/см*^{2} [2]).

Технология приготовления нового вида бетона довольно проста: отмеренное количество мономера ФА перемешивается с заполнителями бетона, затем в пластобетонную смесь для прохождения процесса полимеризации (твердения бетона) вводится бензолсульфокислота, растворенная в ацетоне или спирте. После тщательного перемешивания отвердителя с мономером и заполнителями образуется пластобетон. Сырьем для приготовления вяжущего мономера ФА служат отходы сельского хозяйства: хлопковая шелуха, кукурузные кочерыжки и пр.

Для широкого применения нового вида бетона в строительстве необходимо провести всесторонние исследования его свойств. В настоящее время пластобетон изучается во многих институтах нашей страны [3].

Изучение свойств бетона на мономере ФА в лаборатории строительных материалов Института водных проблем и гидротехники АН УзССР было начато в 1959 г. [1].

Опыты показали, что пластобетон имеет не только большую прочность на сжатие, изгиб, растяжение, но и обладает высокой водонепроницаемостью и стойкостью к истиранию и, следовательно, может использоваться для защиты гидротехнических сооружений от истирания донными наносами.

В 1960 г. исследовались водостойкость, морозостойкость, истираемость и другие свойства пластобетона, а также были проведены опыты по определению влияния вибрирования пластобетонных смесей и различных заполнителей на прочностные показатели пластобетона[1].

---

[1] Работы велись по тематическому плану лаборатории, а также по договорному соглашению с НИИПМ.

На трех гидротехнических сооружениях были заложены опытные участки облицовок из пластобетона с целью выявления долговечности этих облицовок в условиях эксплуатации сооружений.

Вибрирование пластобетона

В 1960 г. мы провели опыты по вибрированию пластобетонных смесей для выявления уменьшения расхода мономера в пластобетоне и для повышения прочности последнего.

Пластобетоны изготовлялись на мономере ФА, полученном на Ферганском гидролизном заводе. В качестве заполнителей пластобетона использовались речной гравий и песок, доставленные с Юмалакского карьера (Ташкентская обл.) Опытные замесы пластобетона готовились с различными дозировками мономера. Бензолсульфокислота добавлялась в бетон в количестве 20% от веса мономера. Для растворения бензолсульфокислоты в нее вводили 10% (по весу) ацетона. Пластобетонная смесь, уложенная в формы, подвергалась вибрированию в течение 1 мин. Образцы пластобетона после хранения их в сухой среде испытывались на сжатие (табл. 1).

Таблица 1

Количество мономера, %	Предел прочности при сжатии, *кг/см²*			
	возраст (в сутках)			
	7	28	60	90
11	398	555	465	489
10	382	448	407	474
8	402	403	339	360
7	322	399	250	388

Опыты показали, что вибрирование не приводит к повышению прочности пластобетона, кроме того, оно не позволяет значительно сократить расход мономера в пластобетоне, так как для приготовления пластобетона применяется вяжущее в виде жидкости. Мономер ФА, являясь жидкостью, легко смазывает зерна гравия и песка, значительно снижает трение между заполнителями, делает пластобетонную смесь очень подвижной. Так, например, при расходе 7% мономера (от веса заполнителей) вяжущего было достаточно для смазки зерен заполнителей, а для заполнения пустот мономера не хватило. Чтобы получить плотный пластобетон, содержание мономера увеличивалось до 10% (от веса заполнителей). При этом подвижность пластобетонной смеси повышалась (осадка стандартного конуса 19 *см*). Чем бо́льшая подвижность у пластобетонной смеси, тем эффект уплотнения ее вибрированием будет меньше.

Следует отметить, что основным преимуществом жестких цементных бетонов перед пластичными состоит в том, что жесткие смеси готовятся с более низким водоцементным отношением. Это дает возможность получить большую прочность бетонных изделий.

Резкого повышения прочности у жестких пластобетонов (в данном случае пластобетоны с малым расходом мономера) по сравнению с пластичными не происходит, поскольку при изготовлении пластобетонных смесей с меньшим или большим количеством мономера активность вяжущего остается постоянной.

Из опытов видно, что применение вибрирования пластобетонных смесей, содержащих в качестве заполнителей гравий и песок, не позволяет значительно снизить расход мономера в пластобетоне и резко повысить его прочность.

Однако все вышесказанное не дает основания пренебрегать вибрированием при изготовлении пластобетона, ввиду того, что все виды

работ по приготовлению его, а также укладка, должны быть механизированы. При вибрировании пластобетон получается несколько плотнее из-за меньшего содержания в нем воздушных пузырьков, лучшего расположения заполнителя, что влияет на повышение основных показателей пластобетона, т. е. прочность, морозостойкость, водонепроницаемость.

Вибрирование особо эффективно, если пластобетон готовить с тонкопомольной добавкой. Так, в лаборатории фурановых соединений (филиал НИИПМ, г. Фергана) была получена высокая прочность пластораствора, приготовленного на заполнителе молотом андезите (тонкопомольная добавка).

Структура пластобетона с тонкопомольной добавкой похожа на структуру цементного бетона. Вяжущее в этом случае представляет собой не жидкость, а тесто, образованное при смешивании мономера с тонкопомольной добавкой.

В лабораторных условиях также готовился пластобетон, в котором заполнителями были гравий и молотый андезит; гравия бралось 60% (по весу), а андезита — 40. Пластобетонная смесь при расходе 10% мономера (от веса заполнителей) имела вид жесткого бетона, и без вибрирования, вручную, плотно уложить такую смесь не удавалось. Укладкой пластобетонной смеси вручную (трамбованием) были приготовлены образцы из пластобетона с расходом 11% мономера (от веса заполнителей). Следовательно, при небольшой разнице в расходе мономера отмечается большая разница в прочности между вибрированным и невибрированным пластобетонами. Так, прочность при сжатии в 28-дневном возрасте вибрированного (в течение 1,5 мин.) пластобетона была 825 *кг/см*^{2}, а пластобетона, уложенного вручную, — 688.

Влияние различных заполнителей на качество пластобетонов и пластораствоpов

В пластобетоны и пластораствоpы для полимеризации мономера ФА вводилась бензолсульфокислота, обладающая сильными кислотными свойствами. В период твердения пластобетона часть бензолсульфокислоты, не израсходованной на полимеризацию, вступала в химическое взаимодействие с некоторыми видами заполнителей и тем самым понижала прочность пластобетона. Этот процесс подтверждался тем, что образцы из пластобетона и пластораствора, приготовленные на обычном гравии и песке, при длительном хранении в воде понижают свою прочность. Бензолсульфокислота со временем, вступая в реакцию с некоторыми минералами, входящими в состав заполнителей, нарушает прочность сцепления наполнителей с мономером. Некоторые заполнители иногда содержат вещества, быстро вступающие во взаимодействие с бензолсульфокислотой.

В лаборатории готовились образцы пластораствора с заполнителем асбестом. Эти образцы не затвердевали, так как в асбесте была щелочь, нейтрализующая часть бензолсульфокислоты, а оставшейся кислоты не хватало для прохождения полной полимеризации мономера. Попытка брать повышенное количество кислоты не дала положительных результатов. При больших дозировках кислоты реакция полимеризации протекала бурно, смесь сильно нагревалась, вспучивалась и загоралась.

Образцы пластораствора, приготовленные на кремнеземистых породах (бентонитовой глине, дарбазинской опоке), также не затверде-

вали из-за содержания примесей, нейтрализующих бензолсульфокислоту.

Прочные образцы были получены на кислотостойких заполнителях: молотом кварцевом песке, андезите, порошкообразном карбиде кремния (абразивный материал). Довольно большую прочность имели образцы, приготовленные на довольно слабом, но стойком к бензолсульфокислоте заполнителе — дробленом природном двуводном гипсе. На прочность пластобетона и пластораствора большое влияние оказывала крупность заполнителей.

Мономер ФА, заполимеризованный без всякого заполнителя, обладает очень низкой прочностью. Образцы (размером 3×3×3 *см*) из затвердевшего мономера в 7-суточном возрасте имели прочность при сжатии около 40 *кг/см*². При введении в мономер вольского песка образцы такого же размера и возраста при испытании на сжатие показали прочность, равную 303 *кг/см*², а образцы на молотом вольском песке — 488. Пластораствор, приготовленный на андезитовом песке (крупностью, как и вольский песок), в 7-дневном возрасте имел прочность при сжатии 330 *кг/см*², а пластораствор, приготовленный на андезитовой муке, — 466. Прочность же образцов, в которых в качестве заполнителей применялись одновременно андезитовый песок и андезитовая мука, была 647 *кг/см*².

Опыты показали, что мономер ФА обладает большой адгезионной (клеящей) способностью: чем больше поверхность заполнителей, тем в большей степени используется адгезионная способность мономера и тем выше прочность пластораствора. Следовательно, для получения пластобетонов и пластораствоpов высокой прочности необходимо использовать в качестве заполнителей не только гравий и песок, а также добавлять в пластобетонные или пластораствоpные смеси тонкопомольные добавки.

Для определения водостойкости пластораствоpов образцы приготовлялись на песке из Юмалакского карьера и андезитовом порошке. Часть образцов (в 28-дневном возрасте) помещалась в воду, а другая — на воздухе.

Испытание образцов на сжатие показало, что пластораствор, приготовленный на песке, после 100-суточного хранения в воде терял 36% прочности по сравнению с пластораствором, находящимся на воздухе. Пластораствор, приготовленный на андезитовом порошке, после выдерживания его в воде в течение 180 суток терял всего 9% прочности.

Опытами установлено, что водостойкость пластобетона почти в 3 раза превышает водостойкость пластораствора. Наибольшей водостойкостью обладают образцы пластобетона с мелким заполнителем — дробленым андезитом, являющимся кислотостойким материалом. Причиной малой водостойкости пластораствоpов, приготовленных на юмалакском песке, состоит в том, что этот песок некислотостоек, кроме того, пластораствоpы по сравнению с пластобетонами имеют гораздо большую поверхность заполнителей. Увеличение поверхности некислотостойкого заполнителя в пластораствоpе может привести к большому снижению его прочности и водостойкости ввиду того, что в этом случае бензолсульфокислота интенсивнее вступает во взаимодействие с заполнителем. Для проверки этого предположения из юмалакского песка, измельченного до тонкости помола цемента, готовились образцы пластораствора, содержащие 20% мономера (от веса заполнителя), и 30% бензолсульфокислоты (от веса мономера). Образцы эти не затвердевали даже при длительном хранении их на воздухе, при-

чем вяжущего для обволакивания всех зерен заполнителя было достаточно, пластораствoрная смесь отличалась пластичностью и удобоукладываемостью.

Пластораствор, полученный на немолотом песке, имел прочность на сжатие в 7-дневном возрасте 437 *кг/см*², а образцы на немолотом юмалакском песке снизили прочность при длительном хранении их в воде.

Таблица 2

Вид заполнителей пластораствора и пластобетона	Дозировка материала от веса заполнителей, %	Возраст образцов, сутки	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся до испытания в сухой среде, *кг/см*²	Предел прочности при сжатии (*кг/см*²) после испытания образцов на морозостойкость при количестве циклов			Потеря прочности после испытания образцов на морозостойкость, %
				50	100	200	
Песок с Юмалакского карьера	Мономер 14,0 Бензолсульфокисл. 4,2	7	437	342	—	—	21,8
То же	То же	7	437	—	322	—	26,3
То же	То же	7	437	—	—	296	32,3
То же	То же	28	560	373	—	—	33,4
То же	То же	28	560	—	330	—	40,0
Андезитовый порошок	Мономер 20,0 Бензолсульфокисл. 4,0	60	860	—	—	800	9,1
Гравий и песок	Мономер 10,0 Бензолсульфокисл. 3,0	28	358	313	—	—	12,6
Гравий и андезитовый порошок	Мономер 10,0 Бензолсульфокисл. 3,0	14	580	532	—	—	8,9

Испытанию на морозостойкость подвергались образцы пластобетона и пластораствора, готовившиеся на заполнителях гравии, песке и дробленом андезите (табл. 2).

Данные таблицы показывают, что более высокой морозостойкостью обладают образцы с заполнителем из кислотостойкого материала — андезита.

Лабораторные данные показали, что ударная прочность, прочность на истирание и атмосфероустойчивость значительно выше у пластобетонов, приготовленных на заполнителях из андезита, чем у пластобетонов — на гравии и песке.

ВЫВОДЫ

1. Пластобетоны на гравии и песке при расходе мономера, обеспечивающего заполнение всех пустот в заполнителях, обладают большой пластичностью, поэтому применение вибрирования для уплотнения пластобетонной смеси большого эффекта не дает.

В том случае, когда в качестве заполнителей применяются не только гравий и песок, но и тонкопомольная добавка, при небольших расходах мономера может быть получена жесткая пластобетонная смесь, для уплотнения которой необходимо применять вибрирование.

2. На основные качества пластобетона или пластораствора (прочность, водостойкость, морозостойкость) очень большое влияние ока-

зывает химический состав заполнителей. Бензолсульфокислота, являясь отвердителем мономера, может вступать в химическую реакцию с некоторыми видами заполнителей бетона или раствора и тем самым понижать их прочность. Пластобетоны и пластораствори на обычном гравии и песке (на кислотостойких заполнителях) имеют малую водостойкость и морозостойкость, поэтому применение их в гидротехническом строительстве рекомендовано быть не может.

3. Пластобетоны на кислотостойких заполнителях, в частности на андезите, имеют очень высокие показатели прочности на сжатие, изгиб, растяжение, истирание и на удар, кроме того, водостойки и обладают высокой морозостойкостью. Все это позволяет говорить о большой перспективности применения пластобетона как материала для защиты гидротехнических сооружений от разрушения, а также для изготовления сборных высокопрочных деталей.

4. Большое влияние на прочность пластобетона и пластораствора оказывает гранулометрия (крупность) заполнителей. Пластораствори, имеющие в качестве заполнителей кроме песка тонкопомольную добавку имеют прочность гораздо большую, чем пластораствори с таким же количеством вяжущего, но без применения тонкопомольной добавки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елшин И. М., Савченко М. Н., Федяй В. Н. Лабораторные и производственные исследования пластобетона на синтетической смоле ФА, Труды САНИИРИ, вып. 100, 1960.
2. Елшин И. М., Остер-Волков Н. Н. Пластобетоны на основе мономера ФА, „Бетон и железобетон", 1960, № 11.
3. Итинский В. И. Промышленное освоение изделий из пластобетона, „Пластические массы", 1960, № 6.

Ю. М. КУЗЬМИНОВ

О КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЧАСТИЦ НА РУСЛОВОМ ОТКОСЕ ИЗ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Теоретические предпосылки. Силовое воздействие потока на частицы дна и откосов русла представляет сложную картину.

Помимо лобового воздействия потока на частицы действует подъемная сила, возникающая вследствие несимметричного обтекания их потоком. Кроме того, благодаря появлению в придонном слое потока вихрей, частица может оказаться и в зоне их действия.

Наличие лобового и подъемного усилий, образующихся при обтекании потоком крупных тел (гравий, галька, булыжник), доказано экспериментами М. А. Дементьева [1] и др. При малых размерах твердых частиц условия их обтекания потоком усложняются: частицы разнообразных размеров и форм размещаются на стенке в случайном порядке; при обтекании их потоком далеко не все частицы будут подвергаться лобовому давлению и подъемной силе: многие из них попадут в зону пониженного давления и в силу этого останутся в состоянии покоя.

Сложность явлений, наблюдающихся в придонном слое потока, затрудняет теоретический анализ вопроса об устойчивости твердых частиц на стенке, поэтому приходится исходить из осредненной картины явления.

Вполне естественно рассмотреть условия устойчивости некоторого поверхностного слоя частиц на единице площади стенки, однородных по своему составу. Это существенно облегчает теоретический анализ, так как суммарную величину лобовых воздействий потока на частицы, образующие поверхность стенки, можно приравнять к касательному усилию потока τ, поскольку оно достаточно точно устанавливается на основании вполне надежных и теоретически обоснованных зависимостей.

Менее определенным будет установление величины подъемной силы и вероятности действия взвешивающего вихревого усилия у стенки. Очевидно, результирующее действие этих подъемных усилий равносильно уменьшению веса частиц в воде.

Необходимо отметить, что с уменьшением размера частиц подъемная сила существенно падает.

Таким образом, наиболее активной силой потока, воздействующей на частицу, будет элементарная сила касательного напряжения (или лобовая сила), отнесенная к поверхности шаровидной частицы

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \tau' = \frac{T}{N},$$

где τ' — элементарная сила касательного напряжения, $кг/м^2$;

T — касательное напряжение на единице поверхности из N частиц;

N — число частиц на единице поверхности стенки.

Следовательно, при данном допущении элементарной силе касательного напряжения со стороны потока противостоит отдельная шаровидная частица, имеющая несколько точек-контактов с подобными ей соседними частицами.

Анализ свойств естественных водонасыщенных песков различного диаметра фракций показывает, что это допущение может оставаться в силе только при d песка выше 1,5 *мм*, частицы которого имеют более или менее округлую форму. Что же касается частиц песка $d < 1{,}5$ *мм*, т. е. мелкозернистого, то у них имеются специфические особенности, отличающие их от крупных частиц.

Как показала микрофотосъемка песка, начиная с $d = 1{,}5$ *мм*, форма частиц с уменьшением d приближается к пластинчатообразной с острыми и неправильными краями (чирчикский песок). При такой форме частиц, характеризующихся большим количеством контактов и увеличенными удельной поверхностью и плотностью, создаются условия для проявления сил зацепления между ними, которые, как указывает В. Н. Маслов, зависят от плотности данного песка в воде [2, 19].

С уменьшением плотности, т. е. с увеличением пористости и диаметра частиц песка более правильной формы, фактор зацепления падает.

Кроме того, мелкозернистые пески $d < 1{,}5$ *мм* обладают свойством удерживать определенное количество воды (гигроскопической, пленочной, капиллярной и подвешенной), характеризуемое коэффициентом водоудерживающей способности — $k_в$. Этот коэффициент является своеобразной характеристикой песка, так как зависит от гранулометрического состава, формы, размеров, взаимного расположения его частиц, величин удельной поверхности и пористости. $k_в$ имеет линейную зависимость от удельной поверхности и пористости песка [3]. Удержанная вода, главным образом, гигроскопическая и пленочная (связанная вода), обволакивая мелкие частицы, повышает их устойчивость „на отрыв", так как физические свойства ее отличаются от свойств обычной воды: плотность составляет 1,2—2,4, значительно повышены вязкость, упругость и прочность на сдвиг [4, 5].

Количество „связанной воды", вызывающей молекулярное (пленочное) сцепление мелких частиц, увеличивается с уменьшением диаметра частиц, т. е. пористости. Таким образом, в водонасыщенных мелкозернистых песках проявляются факторы зацепления и воднопленочной связности, обусловливающие друг друга.

Крупные частицы песка $d > 1{,}5$ *мм*, имея небольшую плотность и округлую форму и, следовательно, минимальное зацепление, неразвитую удельную поверхность, большую пористость, а значит, и ничтожное влияние воднопленочной связности, могут выводиться потоком из равновесия, почти минуя фактор зацепления-связности. Поэтому такие частицы будут сопротивляться касательному напряжению потока в основном своим весом в воде. Что же касается мелких частиц ($d < 1{,}5$ *мм*), то в силу существования факторов зацепления и воднопленочной связности, касательному напряжению потока τ' необходимо вначале „освободить" такую частицу от связей, а затем действовать на нее, как на „несвязанную".

Таким образом, если теоретически рассматривать идентичные условия воздействия потока на крупные и мелкие частицы, то необходимо учитывать ту часть полного, действующего на мелкую частицу

элементарного касательного напряжения τ', которая идет на преодоление сил зацепления-связности, т. е. для нарушения равновесия мелкой частицы ($d<1{,}5$ *мм*), лежащей на горизонтальном дне, необходимо приложить усилие

$$\tau_0' = \gamma h i_0' = \tau_0 + \tau_e = \gamma h i_0 + \gamma h i_e, \qquad (1)$$

где τ_0' — полная сила элементарного касательного напряжения;

i_0' — соответствующий ей уклон;

τ_0 — сила элементарного касательного напряжения, действующая на „освобожденную" частицу;

i_0 — соответствующий ей уклон;

τ_e — сила элементарного касательного напряжения, идущая на преодоление сил зацепления-связности;

i_e — соответствующий ей уклон.

Соответственно для той же частицы, лежащей на откосе и той же глубине, будет

$$\tau' = \gamma h i' = \tau + \tau_e = \gamma h i + \gamma h i_e. \qquad (2)$$

Элементарная сила касательного напряжения, действующая на „несвязанную" мелкую частицу, очевидно, равна:

для горизонтального дна — $\tau_0 = \gamma h \left(i_0' - i_e \right)$,

для откоса — $\tau = \gamma h (i' - i_e)$.

При крупных частицах, пренебрегая силами зацепления-связности, т. е. $i_e = 0$, имеем:

горизонтальное дно — $\tau_0' = \tau_0 = \gamma h i_0' = \gamma h i_0$,

откос — $\tau' = \tau = \gamma h i' = \gamma h i$.

Для распространения критерия устойчивости частиц, лежащих на горизонтальном дне и обтекаемых потоком, на устойчивость откоса [6, 16], получен теоретический коэффициент, учитывающий влияние откоса

$$\Gamma_1 = \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{i}{i_0} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu^2 - \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}, \qquad (3)$$

где τ — полная элементарная сила касательного напряжения, действующая на откосе;

τ_0 — такая же сила, действующая на горизонтальном дне;

μ — коэффициент трения грунта под водой, равный тангенсу угла его естественного откоса в воде;

φ — переменный угол откоса.

Этот коэффициент определен из условия равновесия сил, действующих на крупные шаровидные частицы откоса и дна, обтекаемые потоком, т. е. для $d > 1{,}5$ *мм*, при котором $\tau_e \approx 0$. Соответственно для мелких частиц $d < 1{,}5$ *мм* аналогичный коэффициент будет иметь вид

$$\Gamma_2 = \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\tau' - \tau_e}{\tau_0' - \tau_e} = \frac{i' - i_e}{i_0' - i_e} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu^2 - \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

или

$$\Gamma_2 = \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{i'}{i_0'} = \frac{i_e}{i_0'} + \left(1 - \frac{i_e}{i_0'}\right) \cdot \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\mu^2 - \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}. \qquad (4)$$

В результате анализа основного уравнения сопротивления руслового потока, а также опытов ряда авторов [7—12, 18], оценку устой-

чивости частиц на размываемом дне можно записать так:

$$I_{0_{кр}} = \alpha \frac{d}{h}, \tag{5}$$

где $I_{0_{кр}}$ — критический уклон в момент начальной подвижки частиц;

d — диаметр частиц;

h — глубина плоского потока

$\alpha = \psi\left(\frac{\gamma_н - \gamma}{\gamma}\right)$;

ψ — коэффициент сопротивления или устойчивости шероховатого дна, зависящий от ряда факторов: числа Рейнольдса, относительной шероховатости, эпюры распределения скоростей.

Такой вид критерия может быть распространен на все режимы обтекания потоком частиц, т. е. на все диаметры несвязного размываемого материала [13, 17].

В результате анализа пропускной способности полукруглого русла и распределения изотах в сечениях прямых участков каналов с режимом, близким к равномерному, глубина на откосе принята в виде [6]

$$h_н = \frac{z}{\cos\varphi}. \tag{6}$$

Здесь $h_н$ — нормальная глубина в данной точке откоса;

z — вертикаль в той же точке;

φ — угол откоса (между касательной в точке откоса и горизонталью).

Учитывая выражения (3), (4), (5), (6), критерий устойчивости частиц откоса можно записать следующим образом:

1) $d > 1{,}5$ *мм*

$$\frac{I}{I_0} = \Gamma_1; \quad I = \frac{\alpha \cdot d \cdot \cos\varphi}{z} \cdot \Gamma_1, \tag{7}$$

2) $d < 1{,}5$ *мм*

$$\frac{I}{I_0} = \Gamma_2; \quad I = \frac{\alpha \cdot d \cdot \cos\varphi}{z} \cdot \Gamma_2. \tag{8}$$

Использование критериев (7) и (8) для оценки устойчивости частиц на откосе и для вывода уравнения равноустойчивого откоса требует уточнения коэффициентов Γ_1 и Γ_2, входящих в этот критерий, что и является задачей наших экспериментальных исследований.

Опыты по определению Γ_1 и $\Gamma_2 = f(\varphi)$. При исследовании использовали чирчикский песок, который разбивался на фракции следующего состава: 4,0—3,0; 3,0—2,0; 2,0—1,0; 1,0—0,5; 0,5—0,25; 0,25—0,1 *мм*. После отмучивания песок имел следующие исходные характеристики:

Номер песка	I	II	III	IV	V	VI
Диаметр, *мм*	4,0—3,0	3,0—2,0	2,0—1,0	1,0—0,5	0,5—0,25	0,25—0,1
Средний диаметр, *мм*	3,5	2,5	1,5	0,75	0,37	0,17
W, *мм/сек*	201,2	176,5	148,1	127,7	74,3	28,6
$R_{ed} = \frac{W \cdot d_{ср}}{\nu}$	645	405	204	88	25,3	4,45
δ, *т/м³*	2,50	2,51	2,55	2,56	2,57	2,69
γ, *т/м³*	1,53	1,53	1,52	1,50	1,47	1,47
Пористость, $p = \frac{\delta - \gamma}{\delta}$	0,39	0,39	0,40	0,415	0,43	0,455

Если исходить из теоретических предпосылок, то в выражениях Γ_1 и Γ_2 должен учитываться только один фактор—влияние откоса на устойчивость частиц, слагающих данный откос и горизонтальное дно.

Очевидно, при таком условии к эксперименту предъявляются особые требования.

Влияние откоса, как отношения критических $\frac{\tau}{\tau_0}$, может быть учтено если начальная подвижка частиц откоса и горизонтального дна будет фиксироваться в одинаковых условиях, исключающих действие других факторов, влияющих на устойчивость частиц. Такими факторами, которые должны быть постоянными как на откосе, так и на горизонтальном дне, являются: закон распределения скоростей по вертикали $\varepsilon = \text{const}$; $d = \text{const}$; $h = \text{const}$; $B = \text{const}$; $\gamma_н = \text{const}$; $\gamma = \text{const}$; $p = \text{const}$.

Очевидно, всем этим условиям лучше всего соответствует напорное движение потока в трубе. Исходя из этого, мы сконструировали специальную экспериментальную установку—прибор [14], представляющий собой напорный четырехугольный металлический лоток $l = 2{,}5$ *м*, $b = 15$ *см*. Глубина потока — зазор между поверхностью исследуемого материала и съемной стеклянной крышкой — менялась с помощью винтов, которые опускали или поднимали дно внутри лотка. Напорный бак со сливной стенкой давал возможность поддерживать постоянный напор при всех опытах. Благодаря особенности данной установки — возможности поворота лотка вокруг продольной оси (угол откоса) — сохранялись при всех углах поворота, начиная с нулевого, одинаковые условия (гидравлические и геотехнические) для фиксирования начальной подвижки частиц.

За начальную подвижку во всех опытах принимали момент, когда частицы по оси лотка начинали дрожать, переворачиваться и местами срываться и перекатываться.

Таким образом, для данной фракции песка выявляли один фактор — влияние угла откоса на устойчивость песка. Цель опыта сводилась к следующему: для заданной шероховатости, т. е. фракции песка, при данном угле откоса (поворот лотка), глубине и постоянном напоре фиксировали пьезометрический уклон и расход в момент начальной подвижки частиц. Угол поворота лотка от нулевого до угла естественного откоса определяли лимбом с делениями в градусах. Глубины от 0,5 до 3,5÷4 *см* замеряли линейками.

Критические уклоны замеряли пьезометрическими трубками с нониусом (в начале и конце рабочей части лотка) для перепадов давления более 1,5 *см* и капиллярным уклономером И. К. Никитина для перепадов давления менее 1,5 *см*, что давало точность измерения до 1% во всем диапазоне опытов.

Расход Q (для расчета средней скорости) замеряли диафрагмой, вмонтированной в переходный патрубок в начале лотка, и треугольным водосливом за лотком.

По полученным опытным точкам построена зависимость

$$i_{кр} = f(\varphi, d, h, B, \gamma_н, \gamma, p),$$

(рис. 1), которая показывает критическую устойчивость ($i_{кр}$) частиц в функции от угла откоса φ, глубины и ширины потока h и B, диаметра частиц песка d, его пористости p и $\gamma_н$, γ.

По данным этих же опытов установлены углы естественных откосов песков в воде, как критические углы, при которых происходит скатывание частиц.

На основании зависимости $i_{кр} = f(\varphi, d, h, B, \gamma_н, \gamma, p)$ построен график $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$ (рис. 2), из которого видно, что устойчивость частиц

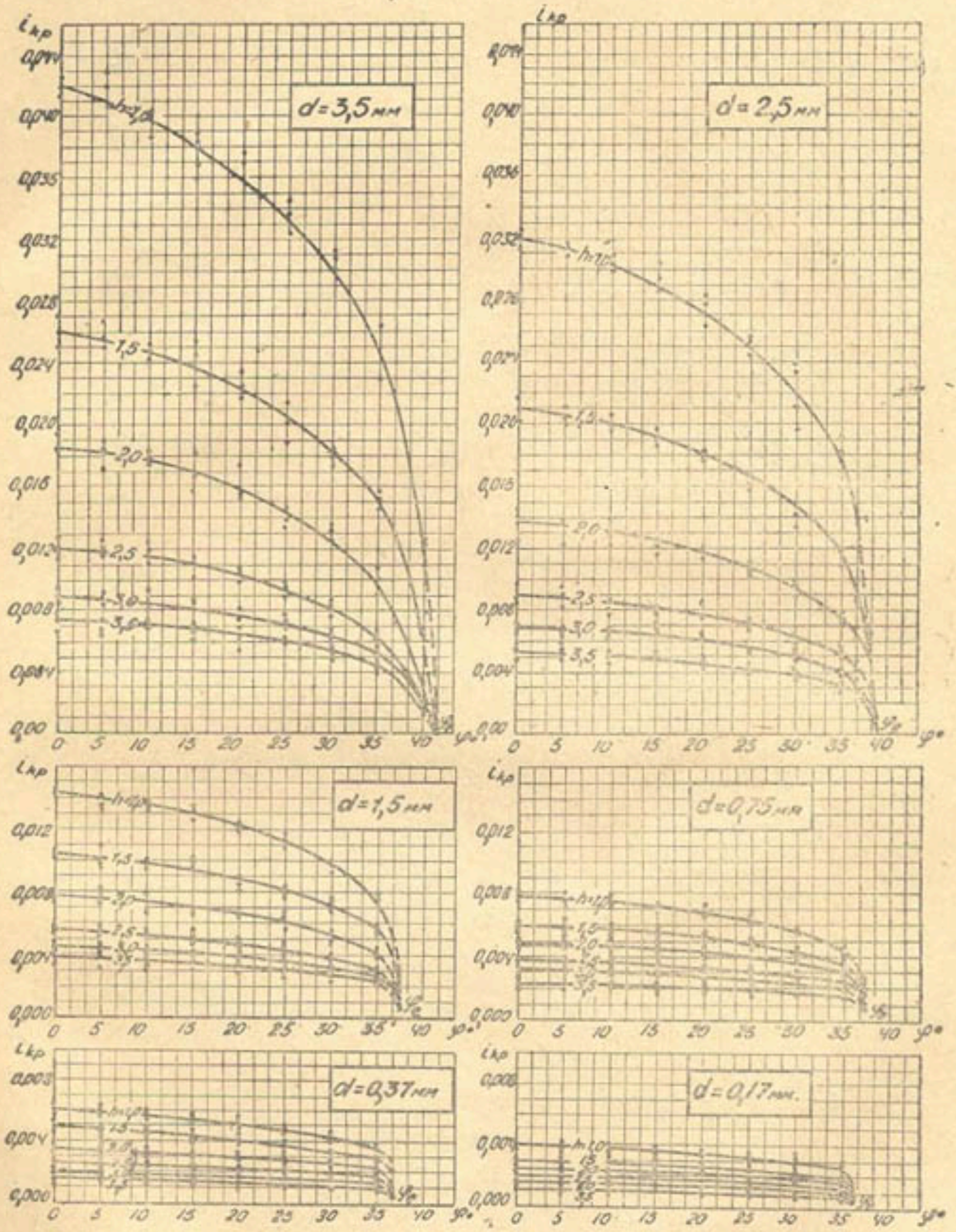


Рис. 1. График зависимости критического уклона от (φ, d, h, B, $\gamma_н$, γ, p).

откоса по сравнению с их устойчивостью на горизонтальном дне падает в зависимости от угла откоса (от 0° до критического, т. е. угла естественного откоса φ_e).

Поскольку для данных фракции и глубины потока менялся только угол откоса, то, очевидно,

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{\gamma h i}{\gamma h i_0} = \frac{i}{i_0},$$

средние значения которых и наносились на график $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$.

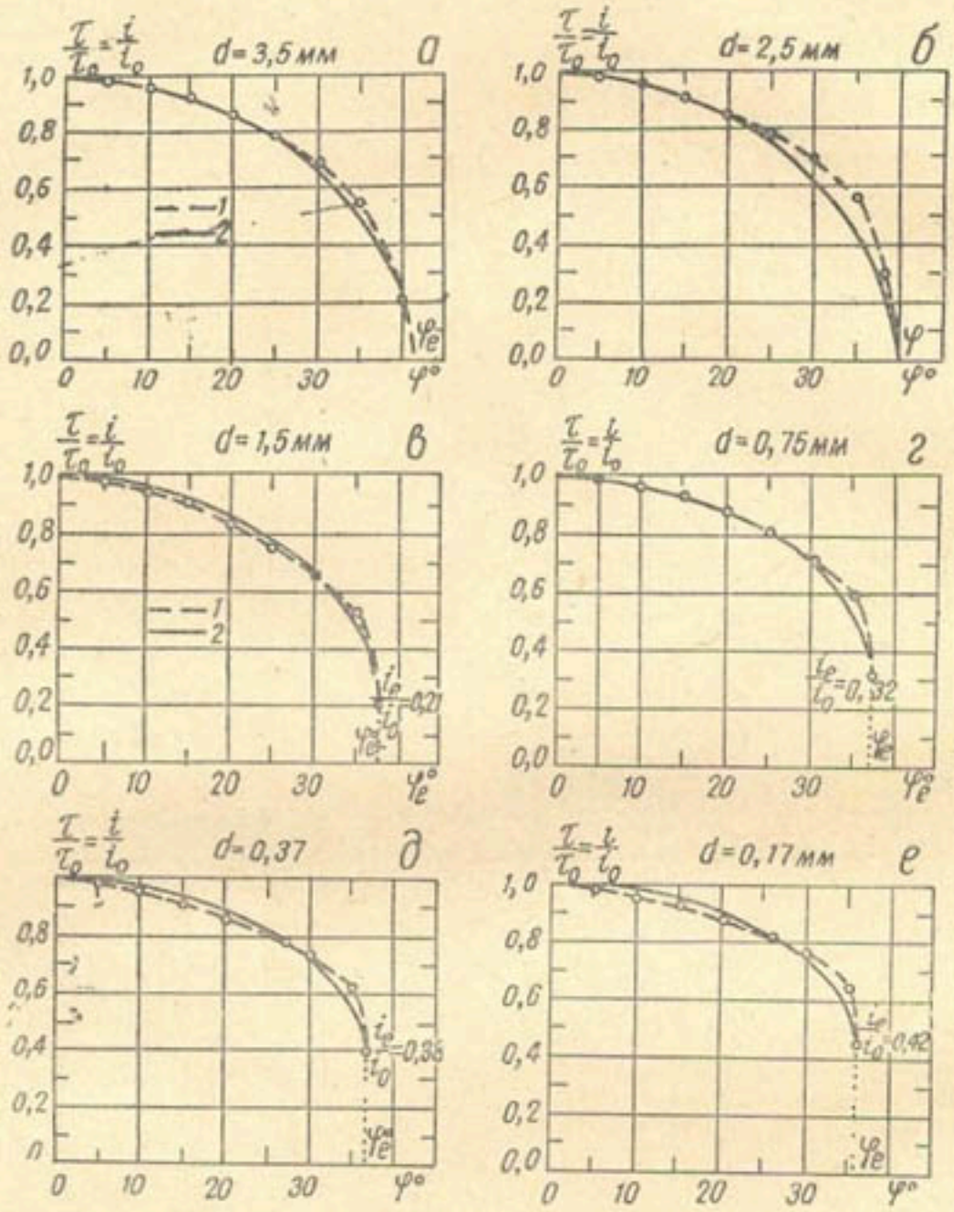


Рис. 2. График зависимости устойчивости частиц $\frac{\tau}{\tau_0}$ от угла откоса φ:

а, б—*1*—по опытам, *2*—по уравнению $\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{1}{\mu}\sqrt{\frac{\mu^2 - \operatorname{tg}^2\varphi}{1+\operatorname{tg}^2\varphi}}$; *в, г, д, е*—*1*—по опытам, *2*—по уравнению $\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{i_e}{i_0} + \left(1 - \frac{i_e}{i_0}\right)\frac{1}{\mu}\sqrt{\frac{\mu^2 - \operatorname{tg}^2\varphi}{1+\operatorname{tg}^2\varphi}}$.

Средние значения точек получены в результате обработки зависимости $\frac{i}{i_0} = f(h)$, построенной по рис. 1 для каждой фракции частиц, которая имела среднюю постоянную величину $\frac{i}{i_0}$ для данных d фракции и угла φ при всех h.

Из зависимости $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$ было обнаружено следующее:

а) кривая устойчивости $\frac{\tau}{\tau_0}$ частиц $d > 1{,}5$ *мм* падает довольно круто с уменьшением угла откоса от 0° до угла естественного откоса φ_e^0, причем $\tau \to 0$, а следовательно и $v \to 0$, при достижении данного песка своего угла откоса φ_e^0;

б) кривая устойчивости $\frac{\tau}{\tau_0}$ частиц $d < 1{,}5$ *мм* падает полого с уменьшением угла откоса от 0^0 до φ_e^0, причем τ, а следовательно и v, стремятся к своему предельному значению, достигая его при угле, близком к φ_e^0 естественного откоса.

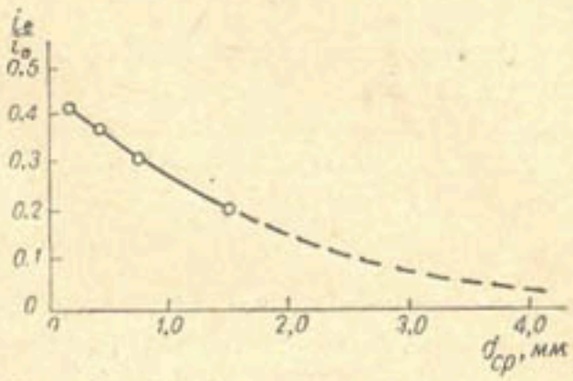


Рис. 3. График зависимости запаса предельной устойчивости частиц $\frac{i_e}{i_0}$ от их среднего диаметра.

Другими словами, углы, близкие к φ_e естественных откосов мелкозернистых песков, способны выдерживать некоторые величины касательного напряжения τ или скорости.

Аналогичную картину мы наблюдали, исследуя начальные углы откоса песчаного ($d = 0{,}1 - 0{,}05$ *мм*) участка Каракумского канала. Это явление объясняется влиянием сил зацепления-связности у мелкозернистых песков, имеющих в силу этого своеобразный запас устойчивости.

На графике $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$ запас предельной устойчивости характеризуется значением $\frac{i_e}{i_0}$, величина которого с уменьшением d мелкозернистого песка увеличивается и, наоборот, у крупного песка значительно уменьшается (рис. 2).

На рис. 3 приведен график $\frac{i_e}{i_0} = f(d_{ср})$, построенный на основании зависимости $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$. Из него видно, что для частиц $d > 1{,}5$ *мм* этим запасом устойчивости можно практически пренебречь, т. е. влияние зацепления-связности незначительно, для мелких же частиц оно проявляется довольно ощутимо.

Используя значения $\frac{i_e}{i_0}$ с графика $\frac{i_e}{i_0} = f(d_{ср})$ (рис. 3) в теоретических коэффициентах Γ_1 и Γ_2, на график $\frac{\tau}{\tau_0} = f(\varphi)$ мы нанесли

$$\Gamma_1 = f(\varphi) \text{ и } \Gamma_2 = f(\varphi).$$

Сравнение экспериментальной и теоретической кривых показало их достаточную сходимость.

ВЫВОДЫ

В результате теоретических и экспериментальных исследований найдены выражения Γ_1 (для $d > 1{,}5$ *мм*) и Γ_2 (для $d < 1{,}5$ *мм*), в кото-

рых учитывается влияние угла откоса на устойчивость его частиц в диапазоне d от 4,0—3,0 *мм* до 0,25—0,1 *мм*.

Проведенные исследования дали возможность получить критерий устойчивости размываемого руслового откоса для диапазона частиц d от 4,0 до 0,1 *мм* в виде

$$I_{кр} = \frac{\alpha \cdot d \cdot \cos\varphi}{z} \cdot \Gamma_1 \quad (\text{для } d > 1{,}5 \text{ мм}), \tag{10}$$

$$I_{кр} = \frac{\alpha \cdot d \cdot \cos\varphi}{z} \cdot \Gamma_2 \quad (\text{для } d < 1{,}5 \text{ мм}). \tag{11}$$

Полученные критерии (10) и (11) при заданных I, d размываемого материала и глубине h дают возможность определить предельный угол φ руслового откоса и наоборот, при заданных угле φ откоса, d размываемого материала, глубине h — критический уклон $I_{кр}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дементьев М. А. „Изв. ВНИИГ", т. 15, 1935.
2. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откосов в гидроэнергетическом строительстве, М.—Л., 1955.
3. Ступаков Г. И. Водные свойства и поверхностная энергия мелкозернистых песков, Труды САНИИРИ, вып. 90, Ташкент, 1957.
4. Андрианов П. И. Связанная вода почв и грунтов, Труды ин-та мерзлотоведения, т. III. М.—Л., АН СССР, 1946.
5. Сергеев Е. М. Общее грунтоведение, М., МГУ, 1951.
6. Кузьминов Ю. М. О форме равноустойчивого откоса, Труды САНИИРИ, вып. 100, Ташкент, 1960.
7. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков, Л., 1954.
8. Егиазаров И. В. „Изв. АН АрмССР", 1949, № 5.
9. Леви И. И. Динамика русловых потоков, М —Л., 1957.
10. Фидман Б. А. О подобии турбулентных потоков, В. сб. „Русловые процессы", М., АН СССР, 1958.
11. Саваренский А. Д. Гасители энергии и крепление русел за плотинами, М., Госстройиздат, 1938.
12. Мостков М. А. Очерк теории руслового потока, М., АН СССР, 1959.
13. Егиазаров И. В. Наука о движении наносов, сопредельные науки и возможности экспериментирования, В сб. „Исследование и комплексное использование водных ресурсов", М., АН СССР, 1960.
14. Кузьминов Ю М. Экспериментальная установка для исследования размываемых откосов русел, Труды САНИИРИ, вып. 100, Ташкент, 1960.
15. Сурова Н. Н. Вопросы методики моделирования размывов русла (учет пористости размываемого грунта), В сб. „Русловые процессы", М., АН СССР, 1958.
16. Lane E. W. Progress report on studies on the design of stable channels by the Bureau of Reclamation, 1953.
17. Никитин И. К. Борьба с наносами на гидроузле с помощью криволинейной песколовки, В сб. „Вопросы гидротехники", вып. I, Ташкент, АН УзССР, 1955.
18. Егиазаров И. В. „Изв. АН АрмССР", 1950, № 1.
19. Маслов Н. Н. Условия устойчивости водонасыщенных песков, М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

Л. П. ЗАЙЦЕВ

СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТА РЕЗАНИЮ РОТАЦИОННЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ КАНАЛООЧИСТИТЕЛЯ

Энергоемкость копания землеройных машин зависит от сопротивления грунта резанию, которое, в свою очередь, находится в зависимости от состояния грунта, его гранулометрического состава, скорости резания и в значительной степени — от формы рабочего органа и способа отделения стружки.

Отечественными учеными собран ценный экспериментальный материал по резанию грунтов различными типами рабочих органов сельскохозяйственных орудий и землеройных машин. Однако до настоящего времени недостаточно изучен вопрос о влиянии толщины стружки a на величину удельного сопротивления грунта резанию q, что особенно важно при расчете машин, разрабатывающих грунт стружками, толщина которых в несколько раз отличается от толщины стружек сельскохозяйственных и землеройных машин общего назначения.

Впервые определение величины сопротивления грунта резанию применительно к работе плуга дано акад. В. П. Горячкиным в его рациональной формуле

$$P = G_1 f + qab + \varepsilon abv^2,$$

где P — тяговое усилие, *кг*;
G — вес плуга, *кг*;
f — коэффициент трения стали о грунт;
q — удельное сопротивление грунта резанию, *кг/см²*;
a — толщина вырезаемого пласта грунта, *см*;
b — ширина резания, *см*;
ε — коэффициент, учитывающий сопротивление на отбрасывание пласта в сторону;
v — скорость движения плуга, *м/сек*.

Первый член этого равенства определяет сопротивление передвижению плуга, второй — сопротивление грунта резанию и третий — сопротивление на отбрасывание пласта в сторону.

Касаясь второго члена формулы, В. П. Горячкин писал, что сопротивление деформации пласта можно считать пропорциональным площади поперечного сечения пласта. Следовательно, коэффициент q, являясь характеристикой грунта по трудности разработки, не зависит от параметров стружки грунта a и b.

При расчете сопротивления копанию землеройных машин пользуются упрощенным уравнением акад. В. П. Горячкина

$$P_1 = q_1 ab,$$

где q_1 — удельное сопротивление копанию.

Проф. Н. Г. Домбровский [3], исследуя работу экскаватора, выявил, что при изменении толщины стружки от 100 до 300 *мм* изменение q_1 не превосходит 6%, т. е. практически может не учитываться.

А. Н. Зеленин [4], проводя многочисленные опыты в полевых и лабораторных условиях с ковшами экскавационных машин, пришел к выводу, что величина q даже для одного и того же профиля меняется с глубиной a. Для малых значений a (до 10 *см*) величина q наименьшая. Далее (при $a > 10$ *см*) наблюдается медленное нарастание значений q.

А. Д. Далин, рассматривая рабочий процесс фрезерных грунтообрабатывающих машин при подачах (или толщинах стружки) от 2,5 до 16,1 *см*, определил, что удельное сопротивление изменяется в гиперболической зависимости от изменения площади поперечного сечения стружки и выражается формулой

$$q = \frac{c}{ab},$$

где c — постоянная величина.

Из вышеизложенного следует, что до настоящего времени нет единого мнения и исчерпывающих данных о влиянии толщины стружки на величину удельного сопротивления резанию. Поэтому при расчете землеройных машин значения q рассматриваются как некоторые постоянные, характеризующие степень трудности разработки грунта для данного рабочего органа, вне связи с толщиной срезаемой стружки (таблица).

Сопротивление копанию q, *кг/см²*
(по Н. Г. Домбровскому)

Категория грунта	Грунт	Механическая лопата	Струг и драглайн	Скрепер
1	Песок рыхлый (сухой)	0,16—0,25	0,28—0,45	0,25—0,40
1	Песок, супесь, суглинок легкий (влажные)	0,30—0,70	0,60—1,20	0,53—1,05
2	Суглинок, гравий, мелкий и средний, глина легкая, влажная или разрыхленная	0,60—1,30	1 —1,90	0,95—1,80
3	Глина средняя или тяжелая разрыхленная, суглинок плотный	1,15—1,95	1,60—2,60	1,75—2,86
4	Глина тяжелая	2,0 —3,0	2,60—4,0	3,20—4,95
4	Конгломерат слабо сцементированный	2,35—3,10	3,10—4,10	—
4	Конгломерат тяжелый с мягкими камнями, плохо взорванный мергель, легкие сланцы, тяжелая сухая глина	2,80—3,25	3,70—4,20	—

Примечание. Для малых моделей ковша (0,3—0,5 *м³*) сопротивление копанию надо увеличивать на 10—12%, а для больших (5—6 *м³*) уменьшать на столько же.

Для землеройных машин общего назначения толщина стружки a в среднем колеблется в пределах 10—20 *см*, тогда как, например,

для каналоочистительных машин с ротационным рабочим органом она не превышает нескольких миллиметров. На рис. 1 представлена одна из таких машин — каналоочиститель Д-342А, на рис. 2 — ее рабочий орган.

Рис. 1. Каналоочиститель Д-342А в работе.

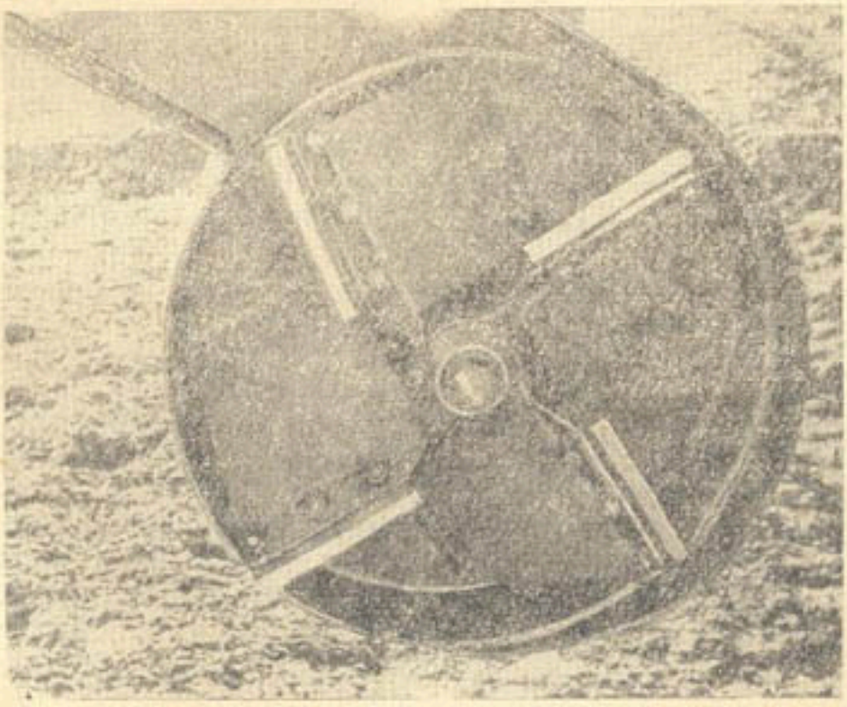


Рис. 2. Ротационный рабочий орган каналоочистителя Д-342А.

При работе машины Д-342А наносы из канала удаляются лопатками рабочего органа, вращающегося со скоростью 394 *об/мин* при

одновременном передвижении трактора. При этом происходит срезание наносов по винтовой линии отдельными стружками и выбрасывание их из русла центробежной силой, развиваемой ротором.

Толщина стружки, в зависимости от скорости передвижения трактора, изменяется от 6 до 10 *мм*.

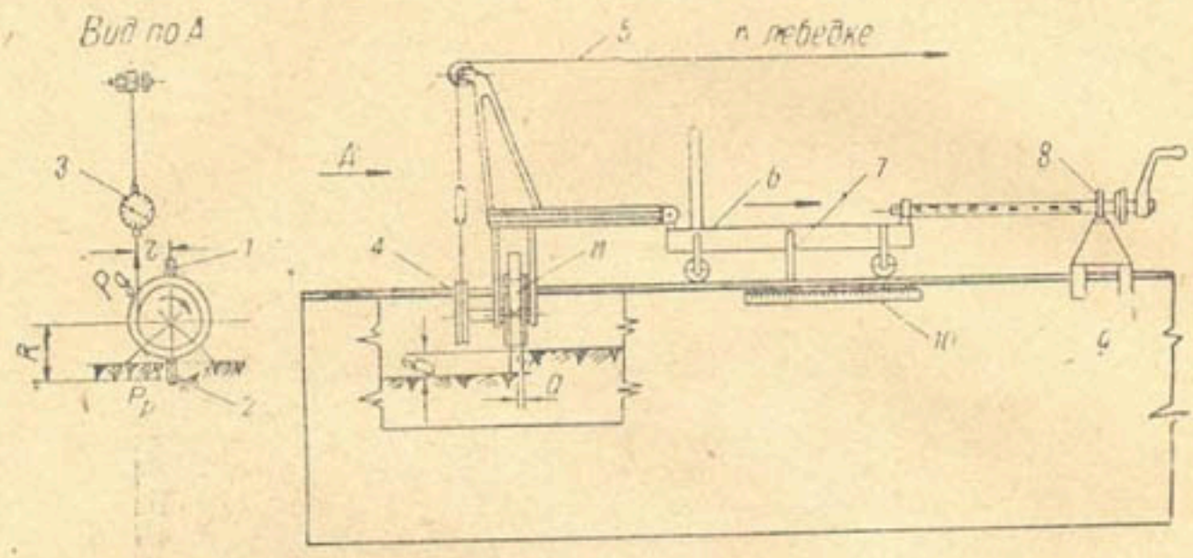


Рис. 3. Экспериментальная установка для определения сопротивления грунта резанию.

Проведенные на Среднеазиатской машиноиспытательной станции испытания каналоочистительных машин Д-342, Д-342А показали, что рабочие органы машин испытывают со стороны грунта сопротивление, намного большее, чем расчетное. Установочная мощность двигателей оказывалась недостаточной при заглублении рабочего органа в наносы на расчетную глубину, в связи с чем резко снижалась производительность машины.

Одной из основных причин большого сопротивления, очевидно, явилось неправильно принятое при расчете значение q.

Отдел механизации водохозяйственных работ Института водных проблем и гидротехники АН УзССР, исследуя ротационный рабочий орган, провел опыты по определению удельных сопротивлений грунта при резании его тонкими стружками применительно к вышеупомянутым каналоочистительным машинам.

Опыты проводили на лабораторной установке (рис. 3), основными частями которой являются: деревянный лоток *9* размером 6×1,5×0,8 *м*, заполненный грунтом, гранулометрический состав которого представлен ниже; тележка *6* с рабочим барабаном *11* для закрепления ножей и различного типа лопаток *1*, *2*; винтовой механизм, состоящий из двух параллельных винтов, соединенных между собой цепной передачей, для подачи всей тележки вдоль лотка; лебедка с электроприводом для создания необходимого усилия в приводном тросе; динамометр (ДТ = 0,2) *3* для измерения тягового усилия в тросе *5*.

Гранулометрический состав грунта

Размеры фракций, *мм*						Наименование грунта, по Охотину
1—0,25	0,25—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	0,01—0,005	0,005<	—
Содержание, %						
6,29	4,15	12,22	39,72	8,17	29,45	Суглинок тяжелый пылеватый

Перед опытами грунт подготавливали следующим образом. Разрыхленный в лотке и доведенный до необходимой влажности грунт тщательно перемешивали, выравнивали, а затем уплотняли. В целях исключения ошибочных результатов при проведении опытов подготовку грунта заканчивали вторичным выравниванием его поверхности.

Влажность грунта определяли методом высушивания проб, а плотность — по его объемному весу. Равномерность уплотнения по всему лотку проверяли ударником ДОРНИИ по числу ударов груза до полного погружения стержня.

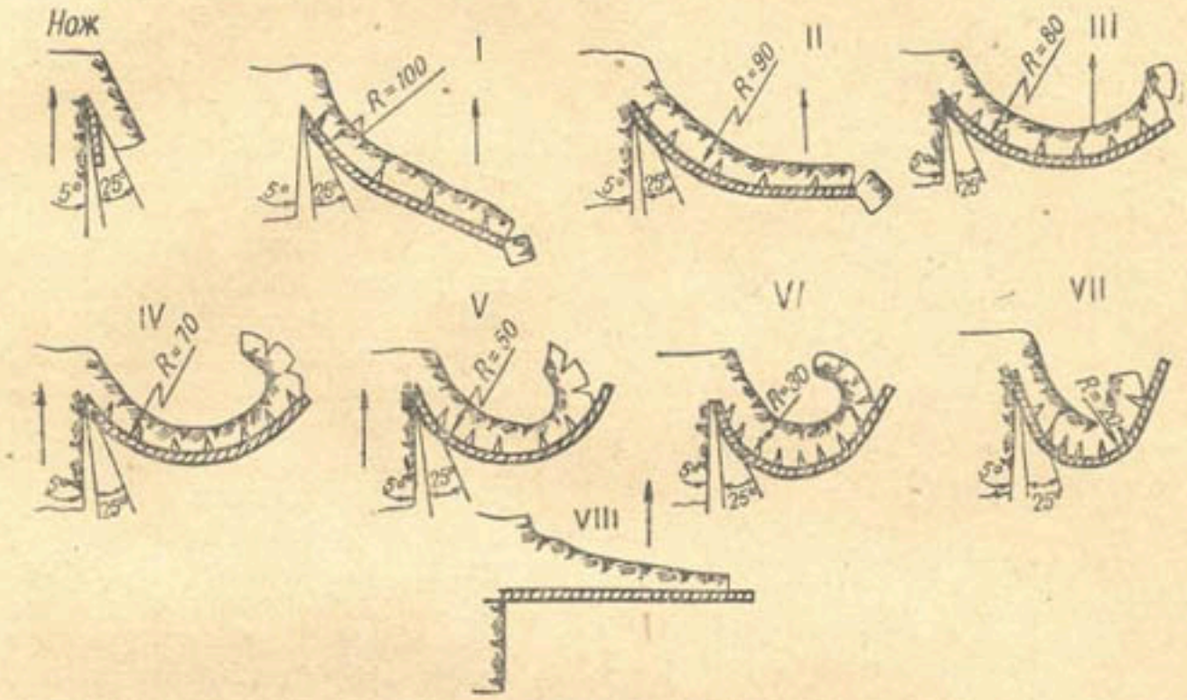


Рис. 4. Поперечные сечения лопаток и формирование стружек на них.

После подготовки грунта перед каждым опытом приводной трос наматывали на шкив барабана в направлении, обратном движению рабочего хода лопатки, с таким расчетом, чтобы при включении лебедки срезалась стружка грунта.

Затем с помощью винтового механизма тележку ставили в исходное положение. Толщину стружки или величину подачи тележки устанавливали по указателю *7* и масштабной линейке *10*, закрепленной на стенке лотка. Резание производилось за счет подтягивания троса лебедкой и поворота барабана *11* на угол, необходимый для определения стружки. Сопротивление резанию находили для одного ножа и восьми типов лопаток, поперечные сечения которых изображены на рис. 4.

Величину усилия в тросе определяли по показанию динамометра. Максимальное значение натяжения соответствовало моменту срезания стружки с наибольшей высотой b.

Величину усилия резания $P_р$ получали по схеме взаимодействия сил по уравнению

$$P_р = P_q \cdot \frac{r}{R},$$

а удельное сопротивление резанию — из выражения $q = \frac{P_р}{ab}$.

Опыты проводили на стружках от 2 до 20 *мм* через каждые 2 *мм* и на стружках толщиной 25 и 30 *мм*. Кроме того, опыты с ножом ставили на стружках 40; 60; 80 и 100 *мм*.

Постоянными величинами при этом были величина заглубления $b = 11$ *см* и скорость резания $v_р = 0{,}2$ *м/сек*.

Для одной серии опытов влажность грунта W поддерживали в пределах 20—25%, а плотность, по ударнику ДОРНИИ, $C = 0{,}3$; для другой серии влажность — 17,5—18,5% и $C = 2 - 2{,}5$; здесь C — количество полных ударов.

Для каждой толщины стружки производилось не менее 10 опытов. На рис. 5 представлены зависимости удельного сопротивления резанию от толщины стружки для грунта различной плотности и влажности.

Из графиков следует, что удельное сопротивление резанию увеличивается с уменьшением толщины стружки в гиперболической зависимости, которая выражается уравнением

$$q = \frac{c}{a^n},$$

где c и n — коэффициенты, зависящие от состояния грунта.

При резании грунта ($W = 28\%$) ножом стружками толщиной от 100 до 30 *мм* (на графике толщина стружки показана до 40 *мм*) удельное сопротивление повышается с 0,3 до 0,5 *кг/см²*, увеличиваясь в 1,65 раза. Дальнейшее уменьшение a сопровождается более интенсивным нарастанием q — для стружки толщиной 2 *мм* q равнялось 4,5 *кг/см²*.

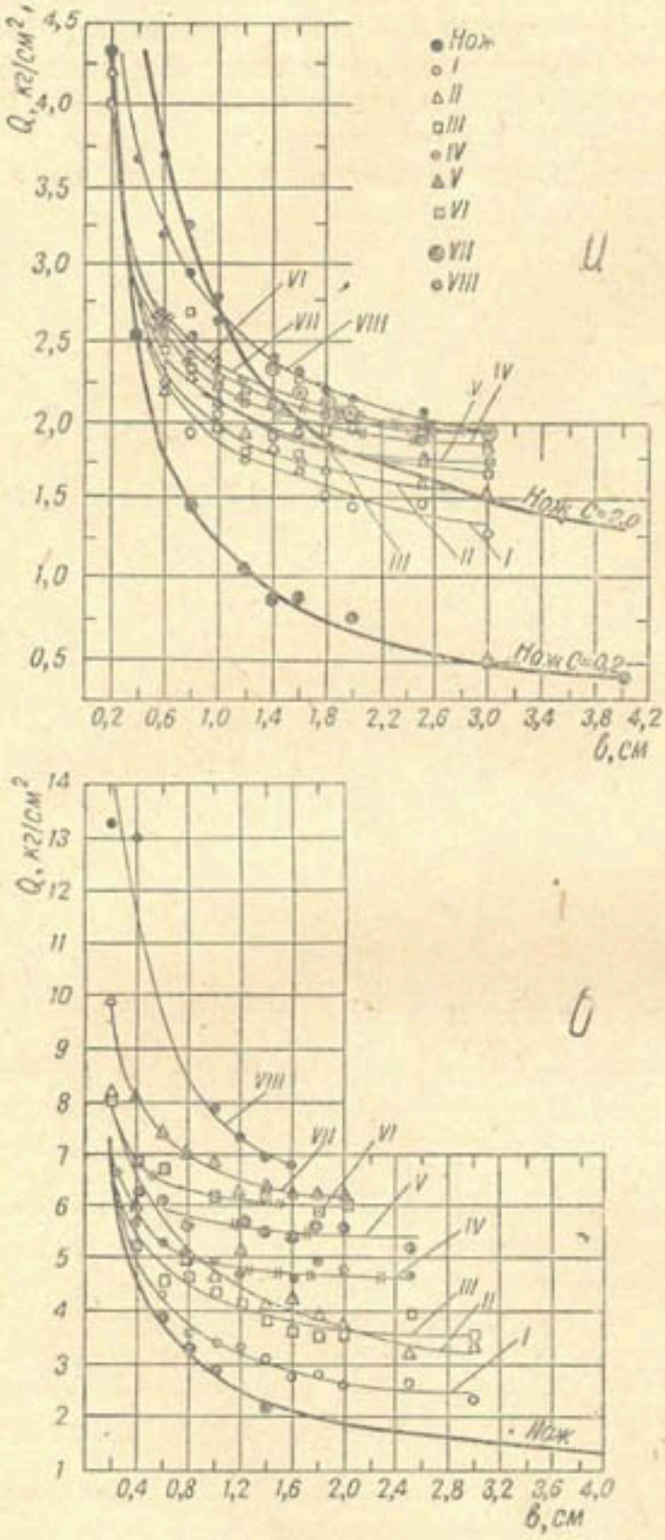


Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления резанию различными типами лопаток от толщины стружки для грунта с различной влажностью 18% и плотностью:
а — $W = 23\%$, $C = 0{,}2$, *б* — $W = 18\%$, $C = 2$ (римскими цифрами обозначены типы лопаток).

С уменьшением влажности грунта и увеличением его плотности численные значения q возрастают, однако характер нарастания q почти не изменяется (рис. 5а, кривая II).

Большие значения удельного сопротивления для тонких стружек объясняются характером распространения напряжений в грунте.

А. Н. Зеленин, исследуя распределение напряжений в разрезаемой среде, нашел, что напряжения, возникающие в грунте под воздействием режущего профиля, уменьшаются с удалением от него. Графически эта зависимость представлена на рис. 6.

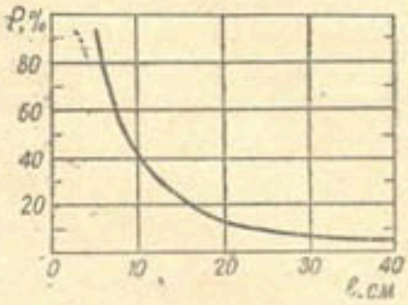


Рис. 6. Распределение напряжений P в зависимости от расстояния перед режущим профилем l.

Степень деформации грунта пропорциональна напряжению. Наибольшая деформация грунта возникает в непосредственной близости от режущего ножа, с удалением от него напряжение в грунте и его деформация уменьшаются. Этим обусловливаются высокие значения удельных сопротивлений при резании тонких стружек.

Опыты, проведенные с различными типами лопаток, показали, что с увеличением кривизны изгиба лопаток сопротивление резанию возрастет.

На грунтах с повышенной влажностью ($W=22-25\%$) форма лопаток сказывается в меньшей мере. При срезании тонких стружек ($a=2-4$ *мм*) значение q почти не зависит от кривизны лопаток. В последующем с увеличением толщины a лопаткам с малым радиусом изгиба соответствуют большие удельные сопротивления, что обусловливается наибольшей деформацией грунта при формировании стружки на лопатке.

Величина

$$q_ф = q_л - q_н,$$

где $q_л$ — удельное сопротивление лопатки;

$q_н$ — удельное сопротивление ножа,

является дополнительным сопротивлением, затрачиваемым на деформирование стружки; на графике она определяется как соответствующая ордината.

Одним из важных требований, предъявляемых к каналоочистительным машинам, считается условие полного выбрасывания подрезанного грунта. С этой точки зрения лопатки III и IV типов наиболее приемлемы, так как их форма при незначительном возрастании $q_ф$ обеспечивает заворачивание стружки на лопатке и исключает возможность потерь грунта до выброса его из канала.

При работе лопаток I и II типов грунт срезается с меньшим удельным сопротивлением, но из-за отсутствия задней завернутой стенки часть грунта выходит за задний край лопатки и остается в канале.

Из вышеизложенного следует, что разработку грунта выгоднее вести стружками с большим значением a. Однако для каналоочистительных машин с ротационным рабочим органом, у которых значительная часть энергии, помимо затраты на отделение стружки, расходуется на отбрасывание грунта в сторону (до 15 *м*), толщина стружки должна определяться из условия большей производительности при наименьшей затрате работы.

ВЫВОДЫ

1. На основании проведенных исследований выявлена гиперболическая зависимость удельного сопротивления резанию от толщины

стружки. При резании тонкими стружками (6—10 *мм*) величина удельного сопротивления резанию в зависимости от состава и состояния грунта увеличивается в пять и более раз.

2. При расчете каналоочистительных машин, разрабатывающих грунт тонкими стружками, следует вводить поправку на увеличение удельного сопротивления в зависимости от толщины стружки.

3. Для каналоочистительных машин необходимо выбирать плавно изогнутые лопатки с максимально возможным радиусом изгиба, обеспечивающим полный выброс грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеева Т. В. и др. Машины для земляных работ, М., Машгиз, 1959.
2. Далин А. Д., Павлов П. В. Ротационные грунтообрабатывающие машины, М., Машгиз, 1950.
3. Домбровский Н. Г. Повышение производительности одноковшовых экскаваторов, М., Стройиздат, 1951.
4. Зеленин А. Н. „Физические основы теории резания грунтов", М., АН СССР, 1950.

В. А. БАРОН

НЕУСТАНОВИВШИЙСЯ ПРИТОК ПОДЗЕМНЫХ ВОД К СКВАЖИНЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Рассмотрим приток подземных вод к совершенной скважине, дренирующей пласт II, учитывая, что кровля и подошва его проницаемы (рисунок).

Предполагая, что сверху в дренируемый пласт поступает грунтовая вода только за счёт инфильтрации ε, а снизу — под действием разности напоров $h - H_0$, где h — пьезометрический напор пласта II и H_0 — пласта IV, составим уравнение неразрывности потока. Оно примет вид [1]

$$2\pi r \sigma \frac{\partial h}{\partial t} dr = 2\pi T k \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial h}{\partial r}\right) + 2\pi r dr \left(\varepsilon + k_2 \frac{h - H_0}{T_2}\right), \qquad (1)$$

где σ — эффективная порозность грунта, слагающего пласт II;

t — время;

r — расстояние (все остальные обозначения показаны на рисунке).

Таким образом, решение задачи о притоке подземных вод к скважине сводится к решению уравнения в частных производных —

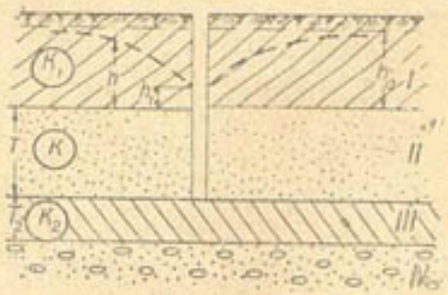
$$\sigma \frac{\partial h}{\partial t} = kT\left(\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial h}{\partial r}\right) + \varepsilon + k_2 \frac{h - H_0}{T_2} \qquad (1')$$

при следующих граничных и начальных условиях:

1) $t = 0, \quad r_0 \leqslant r \leqslant R, \quad h = h_0;$

2) $t > 0, \quad r = r_0, \quad h = h_1$

3) $t > 0, \quad r = R, \quad \frac{\partial h}{\partial r} = 0.$



Здесь R — радиус влияния скважины, а r_0 — радиус самой скважины. Применяя преобразование Лапласа по t к уравнению (1′), получим

$$H'' + \frac{1}{r} H' - \frac{p + \gamma}{\delta}\left[H - \frac{h_0}{p + \gamma} - \frac{\beta}{p(p + \gamma)}\right] = 0, \qquad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{k_2}{\sigma T_2},$$

$$\delta = \frac{Tk}{\sigma},$$

$$\beta = \frac{1}{\sigma}\left(\varepsilon + H_0 \frac{k_2}{T_2}\right),$$

а начальные и граничные условия примут вид

1′) $\quad t = 0, \quad r_0 \leqslant r \leqslant R, \quad H = \frac{h_0}{p};$

2′) $\quad t > 0, \quad r = r_0, \quad H = \frac{h_1}{p};$

3′) $\quad t > 0, \quad r = R, \quad \frac{\partial H}{\partial r} = 0.$

Уравнение (2) есть уравнение Бесселя, решение которого в функциях Бесселя записывается следующим образом:

$$H - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)} = C_1 I_0(\omega r) + C_2 K_0(\omega r), \tag{3}$$

где $I_0(\omega r)$ и $K_0(\omega r)$ — бесселевы функции первого и второго рода нулевого порядка от мнимого аргумента, а

$$\omega^2 = \frac{p+\gamma}{\delta}. \tag{4}$$

Из граничного условия (3′) следует, что

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{K_1(\omega R)}{I_1(\omega R)},$$

а из (2′) —

$$\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)} = C_2 \frac{K_1(\omega R)}{I_1(\omega R)} I_0(\omega r_0) +$$

$$+ C_2 K_0(\omega r_0).$$

Следовательно,

$$C_1 = \left(\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right)\frac{K_1(\omega R)}{U(R, r_0)}, \tag{5}$$

$$C_2 = \left(\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right)\frac{I_1(\omega R)}{U(R, r_0)}$$

и решением для изображения уравнения (1′) является функция

$$H = \frac{h_0}{p+\gamma} + \frac{\beta}{p(p+\gamma)} + \left[\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right] \cdot \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)}. \tag{6}$$

Используя зависимости [3]

$$I_0(iz) = J_0(z), \quad K_0(iz) = \frac{\pi i}{2}[J_0(z) - iY_0(z)],$$

$$I_1(iz) = iJ_0(z), \quad K_1(iz) = -\frac{\pi}{2}[J_1(z) - iY_1(z)],$$

можно показать, что [3], [4] —

$$K_1(\omega R) I_0(\omega r) + K_0(\omega r) I_1(\omega R) = Y_1(\omega R) J_0(\omega r) -$$
$$- Y_0(\omega r) J_1(\omega R) = U(R, r),$$
$$K_1(\omega R) I_0(\omega r_0) + K_0(\omega r_0) I_1(\omega R) = Y_1(\omega R) J_0(\omega r_0) -$$
$$- Y_0(\omega r_0) J_1(\omega R) = U(R, r_0),$$

то по теореме обращения L — изображения решением уравнения (1) является функция

$$h = h_0 e^{-\gamma t} + \frac{\beta}{\gamma}(1 - e^{-\gamma t}) + \frac{h_1}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{\lambda} -$$
$$- \frac{h_0}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{(\lambda + \gamma)} - \frac{\beta}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{\lambda(\lambda + \gamma)}. \tag{7}$$

Используя теорему о вычетах [2], вычислим интегралы

$$\frac{1}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} + \sum_1^\infty \frac{U(R, r)}{\frac{d}{dp}[pU(R, r_0)]_{p=p_n}} e^{p_n t} \times$$
$$\times \frac{1}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{(\lambda + \gamma)} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=-\gamma}} +$$
$$+ \sum_1^\infty \frac{U(R, r)}{\frac{d}{dp}[(p + \gamma) U(R, r_0)]_{p=p_n}} e^{p_n t},$$

$$\frac{1}{2\pi i} \int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{\lambda(\lambda + \gamma)} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} + \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=-\gamma}} +$$
$$+ \sum_1^\infty \frac{U(R, r)}{\frac{d}{dp}[(p + \gamma) pU(R, r_0)]_{p=p_n}} e^{p_n t}.$$

Здесь p_n — корни уравнения $U(R, r_0) = 0$, которое представляется в следующем виде:

$$I_0(\alpha x_n) Y_1(x_n) - I_1(x_n) Y_0(\alpha x_n) = 0,$$

где

$$\alpha = \frac{r_0}{R}, \quad x_n = i\sqrt{\frac{p + \gamma}{\delta}} \cdot R, \quad p_n = -\frac{x_n^2 \delta}{R^2} - \gamma.$$

Корни уравнения (8) определяются графически [4]. Первые четыре значения их можно найти в работах [3], [4]. Так как

$$\frac{d}{dp}[pU(R, r_0)] = U(R, r_0) + pU'(R, r_0),$$

$$\frac{d}{dp}[(p+\gamma)U(R, r_0)] = U(R, r_0) + (p+\gamma)U'(R, r_0),$$

$$\frac{d}{dp}[p(p+\gamma)U(R, r_0)] = (2p+\gamma)U(R, r_0) +$$

$$+ p(p+\gamma)U'(R, r_0)$$

и [2], [4]

$$\frac{d}{dp}U(R, r_0)_{p=p_n} = \frac{1}{\pi A_n(x_n)},$$

где

$$A_n(x_n) = \frac{I_0^2(\alpha x_n) - I_1^2(x_n)}{I_0^2(\alpha x_n) \cdot I_1^2(x_n)} \cdot \frac{1}{p_n}, \tag{8}$$

то

$$\frac{1}{2\pi i}\int_{d-i\infty}^{d+i\infty} e \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} + \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} e^{p_n t},$$

$$\frac{1}{2\pi i}\int_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \cdot \frac{d\lambda}{\lambda+\gamma} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=-\gamma}} +$$

$$+ \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} \frac{\left(\frac{x_n^2 \delta}{R^2} + \gamma\right)}{\frac{x_n^2 \delta}{R^2}} e^{p_n t},$$

$$\frac{1}{2\pi i}\int_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)} \frac{d\lambda}{\lambda(\lambda+\gamma)} = \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} +$$

$$+ \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=-\gamma}} + \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} \frac{e^{p_n t}}{\frac{x_n \delta}{R^2}}.$$

Следовательно,

$$h = h_0 e^{-\gamma t} + \frac{\beta}{\gamma}(1 - e^{-\gamma t}) + h_1 \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} - h_0 e^{-\gamma t} -$$

$$- \frac{\beta}{\gamma} \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=-\gamma}} + \frac{\beta}{\gamma} e^{-\gamma t} + \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} \times$$

$$\times \left(h_1 + \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} + \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t},$$

или

$$h = \frac{\beta}{\gamma} + \left(h_1 - \frac{\beta}{\gamma}\right) \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}} -$$

$$- \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} \cdot \left(h_1 + \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t}. \qquad (9)$$

Так как при $t \to \infty$ последнее слагаемое, содержащее $\sum_1^\infty$, стремится к нулю,

$$h_{t \to \infty} = \frac{\beta}{\gamma} + \left(h_1 - \frac{\beta}{\gamma}\right) \frac{U(R, r)}{U(R, r_0)_{p=0}},$$

а решение дифференциального уравнения (1) для установившегося движения при наших граничных условиях

$$r = r_0, \qquad h = h_1,$$

$$r = R, \qquad \frac{\partial h}{\partial r} = 0$$

имеет вид

$$h = h_0 - (h_0 - h_1) B(\omega, R, R_1),$$

где

$$B(\omega, R, R_1) = \frac{K_0(\omega r) I_1(\omega r) + K_1(\omega r) I_0(\omega r)}{K_1(\omega R) I_0(\omega r_0) + K_0(\omega r_0) I_1(\omega R)},$$

то

$$h = h_0 - (h_0 - h_1) B(\omega, R, R_1) - \pi \sum A_n U(R, r)_{p=p_n} \left(h_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t}, \qquad (10)$$

или

$$h = h_0 - (h_0 - h_1) B(\omega, R, R_1) - \pi \sum_1^\infty A_n U(R, r)_{p=p_n} \left(h_1 + \right.$$

$$\left. + \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{h_1 \frac{k_2}{T_2} + H_0 \frac{k_2}{T_2} + \varepsilon}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t}. \qquad (11)$$

Дебит скважины определим из выражения

$$Q = 2\pi r_0 k T \frac{dh}{\partial r_{r=r_0}}. \qquad (12)$$

Так как

$$\frac{\partial h}{dr} = (h_0 - h_1) \omega B_1(\omega, R, r) - \pi \sum_1^\infty A_n U'(R, r_0)_{p=p_n} \times$$

$$\times \left(h_1 + \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t},$$

где

$$B_1(\omega, R, r) = \frac{K_1(\omega r) I_1(\omega r) - K_1(\omega R) I_1(\omega r)}{K_1(\omega R) I_0(\omega r_0) + K_0(\omega r_0) I_1(\omega R)}$$

и [4]

$$U'(R, r_0) = -\frac{2I_1(\alpha x_n)}{\pi r_0 I_0(\alpha x_n)},$$

то

$$Q = 2\pi r_0 kT \left\{ \omega (h_0 - h_1) B_1(\omega, R, r_0) + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{r_0} \sum_1^{\infty} \frac{J_1^2(x_n)}{J_0^2(\alpha x_n) - J_1^2(x_n)} \left[h_1 - \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n} \right] e^{p_n t} \right\}. \qquad (12')$$

Как показывают вычисления, практически соотношение между $\frac{r_0}{R}$ может изменяться в пределах $0{,}01 > \frac{r_0}{R} > 0{,}00001$ (таблица). Из таблицы следует (с точностью до 5%), что в бесконечной сумме выражения (10) можно ограничиться первыми двумя членами. При этом условии кривая депрессии определится формулой

x_n	x_n	$J_0(\alpha x_n)$	$J_1(x_n)$	$J_0^2(\alpha x_n)$	$J_1^2(x_n)$	$\frac{J_1^2(x_n)}{x_n\left[J_0^2(\alpha x_n) - J_1(x_n)\right]}$
				$\alpha = 0{,}01$		
0,717	0,514	1,000	0,335	1	0,112	0,247
4,290	18,400	0,999	0,169	1	0,028	0,000158
7,546	56,935	0,999	0,146	1	0,021	0,0000374
10,766	115,905	0,997	0,136	1	0,018	0,0000158
				$\alpha = 0{,}001$		
0,569	0,324	1,000	0,273	1	0,075	0,249
4,117	16,900	1,000	0 107	1	0,011	0,00065
7,320	53,582	1,000	0,088	1	0,008	0,000015
10,499	110,240	1,000	0,078	1	0,006	0,0000054
				$\alpha = 0{,}0001$		
0,486	0,236	1,000	0,236	1	0,017	0,072
4,032	17,418	1,000	0,077	1	0,006	0,00037
7,228	52,243	1,000	0,063	1	0,004	0,000077
10,395	108,056	1,000	0,053	1	0,003	0,000003
				$\alpha = 0{,}00001$		
0,431	0,185	1,000	0,210	1	0,012	0,065
3,987	15,896	1,000	0,062	1	0,004	0,00024
7,178	51,523	1,000	0,049	1	0,002	0,000046
10,341	106,936	1,000	0,041	1	0,002	0,00000157

$$h = h_0 - (h_0 - h_1)\, B(\omega, R, r) - \pi \sum_1^2 A_n\, U(R,r)_{p=p_n} \left(h_1 - \right.$$

$$\left. - \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t}. \qquad (13)$$

Рассмотрим первое слагаемое в выражении (12′)

$$\omega (h_0 - h_1) \frac{K_1(\omega r_0) I_1(\omega R) - K_1(\omega R) I_1(\omega r_0)}{K_1(\omega R) I_0(\omega r_0) + K_0(\omega r_0) I_1(\omega R)} =$$

$$= \omega (h_0 - h_1) \frac{\dfrac{K_1(\omega r_0)}{K_1(\omega R)} - \dfrac{I_1(\omega r_0)}{I_1(\omega R)}}{\dfrac{K_0(\omega r_0)}{K_1(\omega R)} + \dfrac{I_0(\omega r_0)}{I_1(\omega R)}}.$$

Так как во всех практических случаях $\omega r_0 < 0{,}01$, то $I_0(\omega r_0) \approx 1$ с точностью до четвертого знака.
Кроме того,

$$\frac{K_1(\omega r_0)}{K_1(\omega R)} \gg \frac{I_1(\omega r_0)}{I_1(\omega R)}$$

и поэтому слагаемым

$$\frac{I_1(\omega r_0)}{I_1(\omega R)}$$

можно пренебречь. Тогда

$$\omega (h_0 - h_1) \frac{K_1(\omega r_0) I_1(\omega R) - K_1(\omega R) I_1(\omega r_0)}{K_1(\omega R) I_0(\omega r_0) + K_0(\omega r_0) I_1(\omega R)} =$$

$$= \omega (h_0 - h_1) \frac{K_1(\omega r_0)}{K_0(\omega r_0) + \dfrac{K_1(\omega R)}{I_1(\omega R)}}, \qquad (14)$$

причём правая часть этого выражения отличается от левой не более чем на 0,1% при любых $\omega R < 10$.

Как видно из таблицы, первый член бесконечной суммы (12′) отличается от суммы всего ряда не более чем на 0,5%. Поэтому

$$\sum_1^\infty \frac{I_1^2(x_n)}{I_0^2(\alpha x_n) - I_1^2(x_n)} \left(h_1 - \frac{h_0 p_n}{\gamma - p_n} - \frac{\beta}{\gamma - p_n}\right) e^{p_n t} \approx$$

$$\approx \frac{I_1^2(x_n)}{I_0^2(\alpha x_n) - I_1^2(x_n)} \left(h_1 - \frac{h_0 p_1}{\gamma - p_1} - \frac{\beta}{\gamma - p_1}\right) e^{p_1 t}. \qquad (15)$$

В работе В. С. Усенко [4] доказано, что при $0{,}00001 < \frac{r_0}{R} < 0{,}01$ и

$$\frac{kTt}{\sigma R^2} > 0{,}2$$

$$\frac{2J_1^2(x_1)}{J_0^2(\alpha x_1)-J_1^2(x_1)}\,e^{-\frac{kTx_1^2 t}{\sigma R^2}} \approx \frac{e^{-\frac{kTx_1 t}{\sigma R^2}}}{x_1}, \tag{16}$$

где

$$x_1 = \frac{2}{\ln\frac{R}{2r_0}}$$

с расхождением правой части выражения (16) не более чем на 0,3%. Поэтому, учитывая выражения (14), (15), (16), мы можем записать, что

$$Q = 2\pi r_0 kT\left\{\frac{\omega(h_0-h_1)K_1(\omega r_0)}{K_0(\omega r_0)+\frac{K_1(\omega R)}{I_1(\omega R)}}+\right.$$

$$+\frac{1}{r_0\ln\frac{R}{2r_0}}\cdot\left[h_0-h_1-\frac{R^2\ln\frac{R}{2r_0}}{2kTr_0}\left(h_1\frac{k_1}{T_2}+\right.\right. \tag{17}$$

$$\left.\left.+H_0\frac{k_2}{T_2}+\varepsilon\right)\cdot\exp\left[-\left(\frac{2kT}{\sigma R^2\ln\frac{R}{2r_0}}-\frac{k_2}{\sigma T_2}\right)t\right]\right.$$

Следовательно, с достаточной для практики точностью кривая депрессии определится формулой (16), а дебит скважины — (17).

Теперь рассмотрим приток подземных вод к скважине, радиус влияния которой стремится к бесконечности. В этом случае задача сводится к решению уравнения (1) при следующих граничных условиях:

1) $t=0,\quad r_0 \leqslant r < \infty,\quad h = h_0 = \text{const};$

2) $t>0,\quad r=r_0,\quad h = h_1 = \text{const};$

3) $t>0,\quad r\to\infty,\quad \frac{\partial h}{\partial r}=0.$

Снова, применяя преобразование Лапласа по t к уравнению (1), получим

$$H''+\frac{1}{r}H'-\frac{p+\gamma}{\delta}\left[H-\frac{h_0}{p+\gamma}-\frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right]=0 \tag{18}$$

с граничными условиями

2′) $t>0,\quad r=r_0,\quad H=\frac{h_1}{p};$

3′) $t>0,\quad r\to\infty,\quad \frac{\partial H}{\partial r}=0.$

Решением зависимости (18) является функция (3), неизвестные постоянные C_1 и C_2 которой определяются следующим образом. В силу

того, что при $r \to \infty$, $I_1 \to \infty$, а

$$\left(\frac{\partial H}{\partial r}\right)_{r\to\infty} = \left[\omega C_1 I_1(\omega_1 r) - C_2 \omega K_1(\omega_1 r)\right]_{r\to\infty} = 0,$$

где

$$\omega_1^2 = \frac{p+\gamma}{\delta},$$

$$C_1 = 0.$$

Так как при $r = r_0$, $H = \frac{h_1}{p}$, то

$$C_2 = \frac{1}{K_0(\omega_1 r_0)}\left[\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right]$$

и, следовательно,

$$H = \frac{h_0}{p+\gamma} + \frac{\beta}{p(p+\gamma)} + \left[\frac{h_1}{p} - \frac{h_0}{p+\gamma} - \frac{\beta}{p(p+\gamma)}\right]\cdot\frac{K_0(\omega_1 r)}{K_0(\omega_1 r_0)}. \qquad (19)$$

Применяя теорему обращения к выражению (19), получим

$$h = h_0 e^{-\gamma t} + \frac{\beta}{\gamma}\left(1 - e^{-\gamma t}\right) + \frac{h_1}{2\pi i}\int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t}\frac{K_0(\omega_1 r)}{K_0(\omega_1 r_0)}\frac{d\lambda}{\lambda} -$$

$$- \frac{h_0}{2\pi i}\int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t}\frac{K_0(\omega_1 r)}{K_0(\omega_1 r_0)}\frac{d\lambda}{\lambda+\gamma} -$$

$$- \frac{\beta}{2\pi i}\int\limits_{d-i\infty}^{d+i\infty} e^{\lambda t}\frac{K_0(\omega_1 r)}{K_0(\omega_1 r_0)}\frac{d\lambda}{\lambda(\lambda+\gamma)}. \qquad (20)$$

Вычисляя интегралы, входящие в последнее уравнение, найдем функцию, определяющую кривую депрессии:

$$h = H_0 + \varepsilon\frac{T_2}{k_2} + \left(h_1 - H_0 - \varepsilon\frac{T_2}{k_2}\right)\frac{K_0(\omega r)}{K_0(\omega r_0)} +$$

$$+ \frac{1}{\pi}\int\limits_0^\infty e^{p_\alpha t} D(\rho, r, r_0)\left(-\frac{h_0}{\rho^2} + \frac{h_1}{\rho^2+\omega^2} + \frac{H_0 + \varepsilon\frac{T_2}{k_2}}{\rho^2 p_\alpha}\right)\rho\, d\rho, \qquad (21)$$

где $p_\alpha = \delta\rho^2 + \gamma$;

$$D(\rho, r, r_0) = \frac{J_0(\rho r_0) Y_0(\rho r) - J_0(\rho r) Y_0(\rho r_0)}{J_0^2(\rho r_0) + Y_0^2(\rho r_0)}.$$

Или учитывая, что $H_0 + \varepsilon\frac{T_2}{k_2}$ по физическому смыслу определяет естественный напор в каптируемом пласте, получим

$$h = h_0 - (h_0 - h_1)\frac{K_0(\omega r)}{K_0(\omega r_0)} + \frac{1}{\pi}\int\limits_0^\infty D(\rho, r, r_0) e^{p_\alpha t} \times$$

$$\times\left[\frac{H_0+\varepsilon\frac{T_2}{k_2}}{p_\alpha\rho^2}+\frac{h_1}{\rho^2+\omega^2}-\frac{h_0}{\rho^2}\right]\rho\,d\rho. \qquad (22)$$

Для определения дебита скважины вычислим $\frac{\partial h}{\partial r}$, предполагая, что

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r\,\partial\rho}=\frac{\partial^2 h}{\partial\rho\,\partial r}$$

$$\frac{\partial h}{\partial r}=(h_0-h_1)\,\omega\,\frac{K_1(\omega r)}{K_0(\omega r_0)}+\frac{1}{\pi}\int_0^\infty D_1(\rho,r,r_0)\times$$

$$\times e^{p_\alpha t}\left(\frac{h_0}{\rho^2}-\frac{h_1}{\rho^2+\omega^2}-\frac{H_0+\varepsilon\frac{T_2}{k_2}}{p_\alpha\rho^2}\right)\rho^2\,d\rho,$$

где

$$D_1(\rho,r,r_0)=\frac{J_1(\rho r)\,Y_0(\rho r_0)-J_0(\rho r_0)\,Y_1(\rho r)}{J_0^2(\rho r_0)+Y_0^2(\rho r_0)}.$$

Следовательно, учитывая (12), получим

$$Q=2\pi r_0 kT\left\{\omega(h_0-h_1)\frac{K_1(\omega r_0)}{K_0(\omega r_0)}+\right.$$

$$+\frac{h_1}{\pi}\int_0^\infty D_1(\rho,r_0,r_0)\,e^{p_\alpha t}\left(\frac{h_0}{\rho^2}-\frac{h_1}{\rho^2+\omega^2}+\frac{H_0+\varepsilon\frac{T_2}{k_2}}{p_\alpha\rho^2}\right)\rho^2\,d\rho.$$

Так как

$$J_1(\rho r_0)\,Y_0(\rho r_0)-J_0(\rho r_0)\,Y_1(\rho r_0)=-\frac{2}{\pi\rho r_0},$$

то

$$Q=2\pi Tkr_0\left\{\sqrt{\frac{\lambda_2}{kTT_2}}(h_0-h_1)\cdot\frac{K_1\left(\sqrt{\frac{\lambda_2}{kTT_2}}r^0\right)}{K_0\left(\sqrt{\frac{\lambda_2}{kTT_2}}r_0\right)}+\right.$$

$$+\frac{h_0}{\pi r_0}\int_0^\infty e^{\left(\frac{-kT\rho^2}{\sigma}+\frac{\lambda_2}{\sigma T_2}\right)t}\times$$

$$\times\frac{\frac{h_0}{\rho^2}-\frac{h_1}{\rho^2+\frac{\lambda_2}{kTT_2}}-\frac{\varepsilon\frac{T_2}{k_2}+H_0}{\rho^2\left(\frac{kT}{\sigma}\rho^2+\frac{\gamma_2}{kTT_2}\right)}}{J_0^2(\rho r_0)+Y_0^2(\rho r_0)}\cdot\rho\,d\rho. \qquad (23)$$

Таким образом, неустановившееся движение в напорном пласте, образующееся при пуске скважины вертикального дренажа в работу

и её дебит, полностью определяется формулами (16), (17) при конечном радиусе влияния и (22), (23) при радиусе влияния, стремящемся к бесконечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод, М., ГТТИ, 1952.
2. Карслоу Х. и Егер Д. Операционные методы в прикладной математике, М., 1948.
3. Лаврентьев М. А. и Шабат Б. В. Методы теории функций комплексного переменного, М., 1958.
4. Усенко В. С. Неустановившийся приток грунтовых вод к скважинам при наличии инфильтрации с поверхности земли, Московский институт инженеров водного хозяйства им. В. Р. Вильямса, т. XXII, 1960.
5. Лейбензон Л. С. Собрание трудов, т. II, М., 1953.
6. Васильев В. А. и Решеткина Н. М. Расчет колодца вертикального дренажа, ДАН УзССР, 1958, 2.

В. А. БАРОН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩЕГО ДЕБИТА СИСТЕМЫ СКВАЖИН ВЕРТИКАЛЬНОГО ДРЕНАЖА

Постановление ЦК КП Узбекистана и Совета Министров УзССР в августе 1956 г. „Об улучшении использования подземных вод и строительстве опытно-производственных систем вертикального дренажа в Голодной степи, Ферганской долине и Бухарской области" способствовало широкому строительству систем скважин вертикального дренажа в республиках Средней Азии. В связи с этим появилась необходимость разработки элементов расчета этих систем применительно к гидрологическим условиям различных районов Средней Азии. Так, например, для того чтобы понизить пьезометрический напор дренируемого пласта на наперед заданную величину, потребовалось определить объем воды, подлежащей откачке (в единицу времени) с площади, на которой проектируется система скважин.

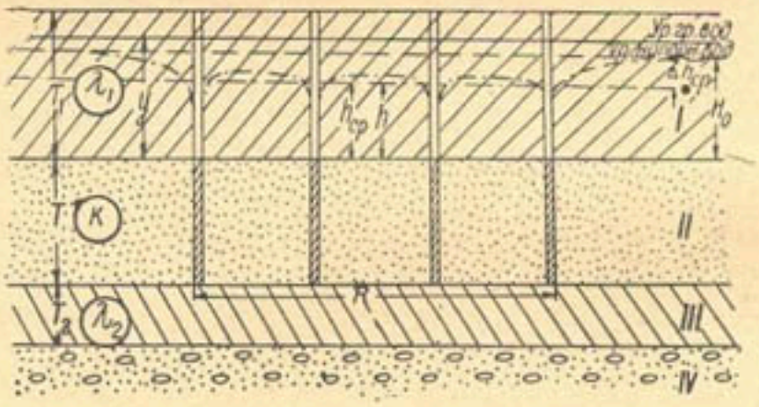


Рис. 1.

Вопрос об определении объема воды рассматривался Н. М. Решеткиной [1] при составлении методических основ организации опытно-производственных исследований вертикального дренажа в Голодной степи. Мы уточнили и дальше разработали методику расчета общего дебита установки системы скважин вертикального дренажа для Голодной степи и для других районов Средней Азии.

Пусть система скважин проектируется на площади F $м^2$ (литологическое строение этого участка и все обозначения, употребляемые ниже, даны на рис. 1). Для простоты расчетов рассматриваемый участок примем за круг радиусом R, а в случае, если он имеет не круговую форму, определим по формулам приведенного радиуса.

Очевидно, что совершенные скважины, вскрывающие основной водоносный горизонт II, питаются за счет притока воды к ним сверху — инфильтрации, по вскрываемому пласту II и снизу — из нижележащего водоносного горизонта IV.

Нам требуется определить, какой объем воды необходимо откачивать с площади F в единицу времени, чтобы добиться понижения пьезометрического напора на величину $\Delta h_{ср}$ в ее пределах. Если обозначим уровень грунтовых вод через Y, пьезометрический напор в пласте II — h, а в пласте IV — $H = \text{const}$, то на основании закона Дарси к системе скважин, расположенных на площади F, поступит в единицу времени сверху $Q_1 = Fv_1$ воды, а снизу —

$$Q_2 = Fv_2,$$

где

$$v_1 = \lambda_1 \frac{Y - h}{Y - T} \tag{1}$$

и

$$v_2 = \lambda_2 \frac{H - h}{T}. \tag{2}$$

Принимая, что напорные воды пласта II питаются сверху только за счет инфильтрации ε, получим

$$v_1 = \varepsilon. \tag{3}$$

Так как до начала откачек пьезометрический напор в пласте II был H_0, а в результате откачек он должен понизиться на $\Delta h_{ср}$, то

$$v_2 = \lambda_2 \frac{H - H_0 - \Delta h_{ср}}{T_2}. \tag{4}$$

Таким образом,

$$Q_1 + Q_2 = F\left(\varepsilon + \lambda_2 \frac{H - h_{ср}}{T_2}\right), \tag{5}$$

где $h_{ср} = H_0 - \Delta h_{ср}$ — пониженный средний пьезометрический напор пласта II в пределах площади F.

Для того чтобы определить объем откачек по дренируемому пласту II, рассмотрим цилиндр высотой T, внутренним радиусом r ($r \gg R$) и внешним $r + dr$. Через торцовые стенки его за время dt втекает $Q_3 + dQ_3$ воды, а вытекает Q_3. В то же самое время сверху и снизу в него поступает $(v_1 + v_2)\, 2\pi r dr dt$ воды. Из условия сплошности потока получим

$$dQ_3 = -(v_1 + v_2)\, 2\pi r dr, \tag{6}$$

где

$$Q_3 = 2\pi r k T \frac{dh}{dr}. \tag{7}$$

Учитывая выражения (3), (4) и (7), из уравнения (6) получим

$$\frac{d^2h}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dh}{dr} = -\left(\varepsilon + \lambda_2 \frac{H - h}{T_2}\right)\frac{1}{kT}, \tag{8}$$

или

$$\frac{d^2h}{dr^2}+\frac{1}{r}\frac{dh}{dr}+\omega^2\left(\tilde{h}-h\right)=0, \tag{9}$$

где $\omega^2=\frac{k_2}{kTT_2}$ и $\tilde{h}=H+z\frac{T_2}{k_2}$.

Величина $\tilde{h}$ определяет пьезометрический напор грунтового потока в пласте II на бесконечности, равная, следовательно, напорности этого пласта до начала откачек.

Уравнение (8) есть уравнение Бесселя, решение которого в функциях Бесселя [2], [3] имеет вид

$$\tilde{h}-h=C_1I_0(\omega r)+C_2K_0(\omega r), \tag{10}$$

где C_1 и C_2 — постоянные, определяемые из граничных условий;

$I_0(\omega r)$ и $K_0(\omega r)$ — цилиндрические функции мнимого аргумента нулевого порядка, соответственно первого и второго рода.

Рассмотрим решение (5) для конечного и для бесконечного значений радиуса влияния R_1.

При конечном радиусе влияния на поток, движущийся к системе скважин, накладываем следующие граничные условия:

1) при $r=R$, $h=h_{ср}$;

2) при $r=R_1$, $\frac{\partial h}{\partial r}=0$.

Из этих граничных условий следует, что в выражении (10)

$$C_1=\frac{\left(\tilde{h}-h_{cp}\right)K_1(\omega R_1)}{K_1(\omega R_1)I_0(\omega R)+K_0(\omega R)I_1(\omega R_1)},$$

$$C_2=\frac{\left(\tilde{h}-h_{ср}\right)I_1(\omega R_1)}{K_1(\omega R_1)I_0(\omega R)+K_0(\omega R)I_1(\omega R_1)}$$

и

$$h=\tilde{h}-\left(\tilde{h}-h_{ср}\right)\frac{I_0(\omega r)K_1(\omega R)+K_0(\omega r)I_1(\omega R)}{K_1(\omega R_1)I_0(\omega R)+K_0(\omega R)I_1(\omega R_1)}. \tag{11}$$

Так как производная от этого выражения по r имеет вид

$$\frac{\partial h}{\partial r}=\omega\left(\tilde{h}-h_{ср}\right)\frac{K_1(\omega r)I_1(\omega R_1)-I_1(\omega r)K_1(\omega R_1)}{K_1(\omega R_1)I_0(\omega R)+K_0(\omega R)I_1(\omega R_1)},$$

а приток грунтовых вод по пласту к скважинам определяется формулой

$$Q_2=2\pi RTk\left(\frac{\partial h}{\partial r}\right)_{r=R}, \tag{12}$$

то

$$Q_2=2\pi RTk\omega\left(\tilde{h}-h_{ср}\right)\frac{K_1(\omega R)I_1(\omega R_1)-I_1(\omega R)K_1(\omega R_1)}{K_1(\omega R_1)I_0(\omega R)+K_0(\omega R)I_1(\omega R_1)}. \tag{13}$$

В случае, когда радиус влияния системы скважин стремится к бесконечности, граничные условия 1 и 2 преобразуются в следующие:

1′ при $r=R$, $h=h_{ср}$;

2′ при $r \to \infty$, $\frac{\partial h}{\partial r} = 0$.

Учитывая 1′ и 2′ в решении (10), определяем постоянные, которые оказываются равными

$$C_1 = 0 \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{\tilde{h} - h_{cp}}{K_0(\omega R)}.$$

Следовательно, из (10) следует, что кривая депрессии дренируемого участка определяется уравнением

$$h = \tilde{h} - \left(\tilde{h} - h_{cp}\right) \frac{K_0(\omega r)}{K_0(\omega R)}. \qquad (14)$$

Взяв производную по r от этого выражения и подставив ее в (11), найдем дебит системы скважин

$$Q_3 = 2\pi RTk\omega \left(\tilde{h} - h_{cp}\right) \frac{K_1(\omega R)}{K_0(\omega R)}. \qquad (15)$$

Таким образом, в случае конечного радиуса влияния системы скважин кривая депрессии участка с пониженным пьезометрическим напором определяется формулой (11), а суммарный приток подземных вод, поступающий к нему,— формулой (13).

В случае же бесконечного радиуса влияния кривая депрессии находится по формуле (14), а приток по каптируемому пласту — по формуле (15).

В целях облегчения использования формулы (13) нами построены графики зависимости

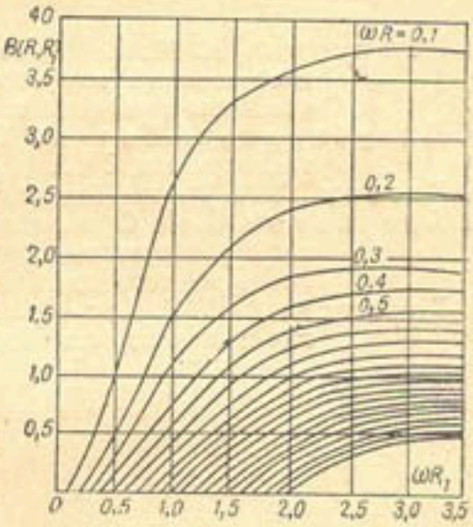


Рис. 2. График зависимости $B(R, R_1)$ от ωR_1.

$$B(R, R_1) = \frac{K_1(\omega R) I_1(\omega R_1) - I_1(\omega R) K_1(\omega R_1)}{K_1(\omega R_1) I_0(\omega R) + K_0(\omega R) I_1(\omega R_1)}$$

от ωR_1 для $0{,}1 \leqslant \omega R \leqslant 2{,}0$ (рис. 2).

Как видно из графиков, дебит системы скважин с увеличением R_1 растет только до определённого предела, после которого практически дальнейшее увеличение радиуса на дебит влияния не оказывает.

Так, например, за такое значение ωR_1 можно принять $\omega R_1 = 2{,}4$ при $\omega R = 0{,}3$.

Величину R_1, которая при дальнейшем увеличении не оказывает практического влияния на дебит системы, примем за радиус контура питания.

Вычисления показывают, что Q_3, определяемый по формуле (15), на 5—7% оказывается больше Q_3, определяемого формулой (13), при R_1, равном радиусу контура питания.

Следовательно, из всего вышеизложенного следует, что для понижения пьезометрического напора дренируемого пласта II в пределах проектируемой площади F на величину Δh_{cp} необходимо откачивать

с её пределов в единицу времени объём воды

$$Q = F\left(\varepsilon + \lambda_2 \frac{H - h_{cp}}{T_2}\right) + Q_3, \tag{16}$$

учитывая, что Q_3 определяется формулами (13) и (14), а

$$h_{cp} = \frac{1}{l} \int_{r_i}^{r_{i+1}} h(r)\, dr. \tag{17}$$

Причем в последнем выражении r_i и r_{i+1} — координаты i-й и $i+1$-й скважины, между которыми определяется среднее понижение пьезометрического напора, а l — расстояние между этими скважинами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Решеткина Н. М. Методические основы организации опытно-производственных исследований вертикального дренажа в Голодной степи, Материалы к освоению Голодной степи, Ташкент, 1959.
2. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод, М., Гостехтеориздат, 1952.
3. Ватсон Г. Н. Теория Бесселевых функций, ч. 1, 2, М., ИЛ, 1959.
4. Аверьянов С. Ф. О расчете осушительного действия горизонтального дренажа в условиях напорного питания, Труды Московского института инженеров водного хозяйства им. В. Р. Вильямса, т. 22, 1960.
5. Гиринский Н. К. Некоторые вопросы динамики подземных вод, Гидрогеология и инженерная геология, Сборник статей, 9, Л, 1947.

Э. И. ГРИНЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКРЫТОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ДРЕНАЖА НА ЦЕЛИННЫХ ЗЕМЛЯХ ГОЛОДНОЙ СТЕПИ

В 1958—1959 гг. в Голодной степи по инициативе Главголодностепстроя был создан опытно-производственный участок закрытого горизонтального дренажа (рис. 1).

Валовая площадь данного участка составляла 295 *га*.

Создание дренажа было вызвано быстрым подъемом уровня грунтовых вод на осваиваемых целинных землях Голодной степи. До освоения целины глубина залегания уровня грунтовых вод в пределах опытного участка составляла 5—10 *м*, а с развитием орошения (в 1957 г.) — уже 2—3 *м*.

Дренаж строился по проекту Узгипроводхоза механизированным способом, с помощью дреноукладчика. Первый вариант дреноукладчика сконструирован Главголодностепстроем и модернизирован отделом механизации ИВПиГ АН УзССР (бывш. САНИИРИ). В дальнейшем отдел механизации создал свой вариант дреноукладчика, который обладал значительными преимуществами по сравнению с дреноукладчиком Главголодностепстроя. Он обеспечивал более высокую точность укладки труб и фильтрующей обсыпки, надежность в работе, постоянный контроль за качеством укладки труб, бо́льшую глубину укладки, возможность укладки звеньев труб большей длины и разного диаметра и т. д.

На опытном участке было заложено 10 дрен общей длиной 7,3 *км*.

Все дрены, кроме Д-6-1, вытянуты с юга на север и впадают в открытый коллектор. Длина отдельных дрен равна 250—920 *м*, глубина — 2,2—3,0—3,5 *м*. Расстояние между ними 300—500 *м*. Уложены они из звеньев асбоцементных труб длиной 330 *мм* и диаметром 141 *мм*. Устьевые трубы имеют диаметр 189 *мм*. Стыки дренажных труб ничем не прикрыты. Трубы обсыпаны фильтром из отмытого неотсортированного гравия из Беговатского карьера. Слой фильтра под трубой—20—25 *см*, над трубой— 10—15 *см*.

На дренах через каждые 200 *м* устроены контрольные колодцы, трубы для этих колодцев также изготовлены из асбоцемента и имеют диаметр 546 *мм*, а в местах пересечения и поворотов — смотровые колодцы, устроенные из железобетонных колец диаметром 1000 *мм* и длиной 1000 *мм*. Опорные плиты под колодцами имеют квадратную форму (рис. 2).

Описание строительства закрытых дрен, методика проведения исследований и результаты работы закрытых дрен в первые месяцы после строительства были опубликованы автором в 1960 г.

В настоящей статье приведены результаты исследований за 1959—1960 гг.

Содержание солей в почвогрунтах. В 1958 г. по всей территории опытного участка в междреньях и вблизи дрен были взяты образцы

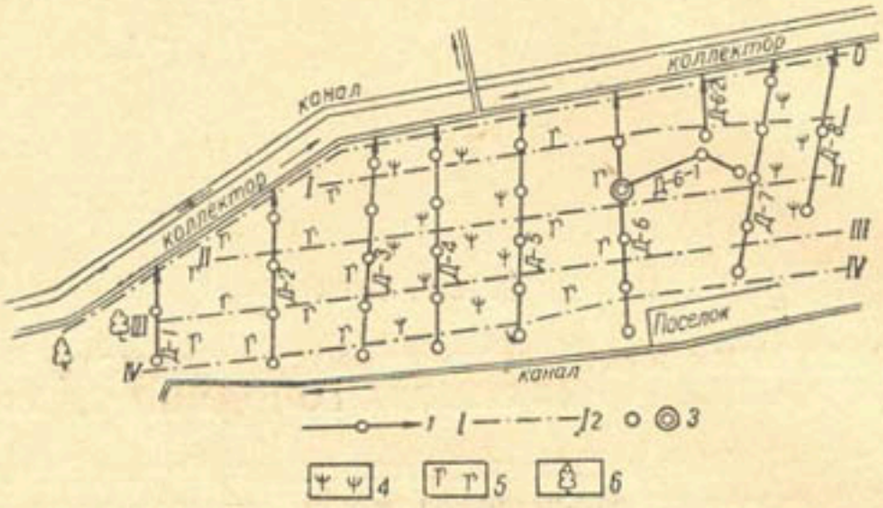


Рис. 1. Схема опытного участка закрытого дренажа:

1 — закрытые дрены; *2* — створы наблюдательных скважин; *3* — наблюдательные и смотровые колодцы на дренах; *4*—посевы хлопчатника; *5*—посевы люцерны, *6*—лесные посевы.

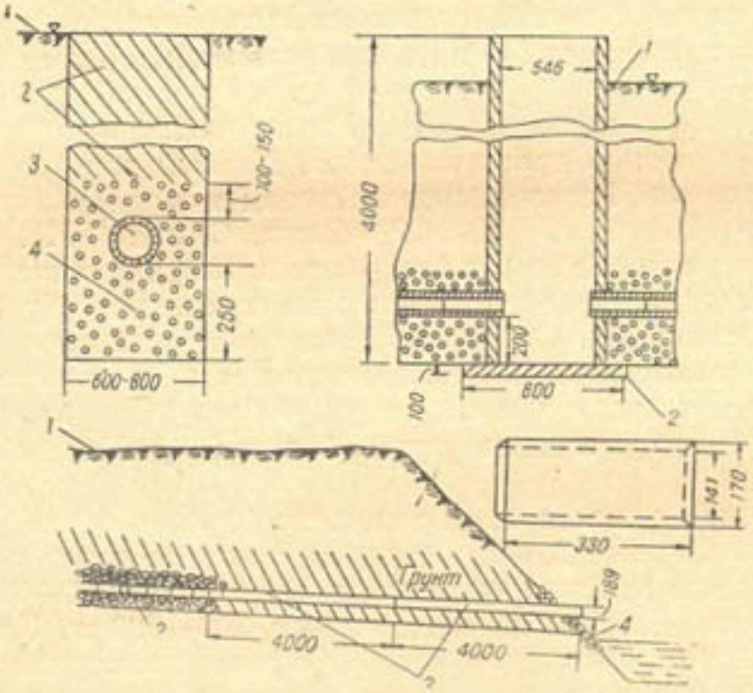


Рис. 2. Конструкция закрытых дрен:

А — поперечный разрез дрены: *1* — поверхность земли; *2* — грунт, *3* — дренажная труба, *4* — фильтрующая обсыпка из гравия.

Б — контрольный колодец: *1* — поверхность земли, *2* — опорная железобетонная плита.

В — устье дрены: *1*— поверхность земли, *2*— дренажные трубы в гравийной обсыпке, *3* — устьевые трубы, *4* — отмостка рваным камнем.

Г— звено дренажной трубы (все размеры даны в миллиметрах).

почвогрунтов для анализа на засоление. В 1960 г. анализы почвы повторены. В результате исследований почв мы подсчитали среднее содержание плотного остатка и хлор-иона в почвогрунтах (табл. 1).

На основании данных табл. 1 были определены запасы солей в тоннах на 1*га* в 1-, 2-, 3-метровой верхней толще почвогрунтов (табл. 2).

Из табл. 1, 2 видно, что на фоне закрытого дренажа за двухлетний период произошло рассоление верхней 3-метровой толщи почвогрунтов, особенно значительное по хлору. Необходимо отметить, что промывные поливы в указанный период не проводились и вымыв солей происходил под влиянием вегетационных поливов.

Если в 1958 г. почвогрунты Голодной степи, по классификации Б. В. Федорова относились к категории засоленных и сильнозасоленных, то в 1960 г. по содержанию хлора они уже относились к категории слабозасоленных, за исключением верхнего 60-сантиметрового, среднезасоленного слоя.

За двухлетний период было вымыто хлор-иона примерно 50%, а плотного остатка — 10% от первоначального количества.

Таблица 1

Содержание солей в почвогрунтах опытного участка

Горизонт, *см*	Годы			
	1959		1960	
	плотный остаток, % к весу почвы	в том числе хлор-ион	плотный остаток, % к весу почвы	в том числе хлор-ион
0—20	1,660	0,074	1,675	0,099
20—40	1,742	0,100	1,580	0,076
40—60	1,774	0,098	1,480	0,046
60—80	1,831	0,095	1,430	0,033
80—100	1,952	0,122	1,410	0,029
100—120	1,818	0,116	1,420	0,030
120—140	1,805	0,112	1,406	0,026
140—160	1,679	0,111	1,233	0,033
160—180	1,670	0,117	1,370	0,031
180—200	1,389	0,117	1,202	0,030
200—250	1,114	0,103	0,972	0,033
250—300	0,931	0,078	0,914	0,034

Данные табл. 1 и 2 показывают также, что рассоление в основном произошло в слое 0,5—1,5 *м* по плотному остатку и 0,5—2,5 *м* по хлору. В верхнем же полуметровом слое количество солей по-прежнему осталось значительным. Это объясняется тем, что именно в верхнем слое

Таблица 2

Запасы солей в почвогрунтах опытного участка

Годы	Запасы солей, *т/га*					
	слой, *м*					
	0—1		1—2 / 0—2		2—3 / 0—3	
	плотный остаток	в том числе хлор-ион	плотный остаток	в том числе хлор-ион	плотный остаток	в том числе хлор-ион
1958	258	15	235 / 493	17 / 32	157 / 650	14 / 46
1960	223	8	204 / 427	5 / 13	145 / 572	5 / 18

происходят активные процессы испарения капиллярных токов, а также отложения солей, приносимых с оросительной водой. Накоплению солей в верхнем слое, кроме того, способствовало отсутствие промывных поливов.

Слабая степень рассоления по плотному остатку также связана с отсутствием промывных поливов. Хлор же, как наиболее активный, легко вымывался и под действием вегетационных поливов. Однако следует иметь в виду, что фактические оросительные нормы значительно превышали плановые (в 1,5—2,0 раза).

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что на фоне закрытого дренажа с помощью промывных поливов и соответствующей агротехники можно за 1—2 года рассолить корнеобитаемый слой почвогрунтов.

Динамика грунтовых вод на территории опытного участка детально изучалась в 1959 г. Наблюдения проводились по 64 скважинам, расположенным на створах 0—0,1—I, II—II, III—III и IV—IV (рис. 1).

ЮГК в 1959 г. не заполнялся оросительной водой. Он по существу являлся коллектором и оказывал большое влияние на режим грунтовых вод опытного участка. Поэтому створы наблюдательных скважин были размещены параллельно ЮГК.

В невегетационный период, при отсутствии поливов, грунтовые воды на опытном участке находились на глубине 3,40—4,20 *м*. Направление уклона зеркала грунтовых вод совпадало с направлением уклона поверхности земли (на север). Величина уклона в невегетационный период составляла 0,0072—0,0086, а в вегетационный — до 0,01 при уклоне поверхности земли 0,0062—0,0070. С апреля-мая, когда начинались вегетационные поливы, уровень поднимался, достигая максимума в августе. Изменение уровня происходило неодинаково в различных местах участка.

Ниже описываются режимы грунтовых вод по каждому створу.

Створ О—О. В течение всего 1959 г. грунтовые воды были на глубине 4—5 *м*. Минимальная высота уровня отмечалась в январе, максимальная — в вегетационный период — с мая по сентябрь. В июне — августе произошло повышение уровня в среднем на 10—20 *см*, с максимумом до 70 *см*. В ноябре 1959 г. уровень грунтовых вод был на 0,80—1,00 *м* ниже, чем в ноябре 1958 г.

Створ I—I. В невегетационный период глубина грунтовых вод составляла 3,70—4,00 *м*. С мая уровень их начал подниматься. В июле-августе глубина их вблизи дрен была равна 3,0—3,5 *м*, в местах интенсивных поливов (вблизи Д-4)—2 *м*, а в междреньях в июле-августе — 2,0—3,0 *м*.

Со второй половины августа началось снижение уровня со скоростью 2,8—3,5 *см/сутки*.

Створ II—II. Грунтовые воды в невегетационный период находились на глубине 3,20—3,70 *м*. С началом поливов уровень их поднимался, достигнув максимума в июле-августе (1,0—2,0—2,5 *м*).

На участках, где проводились поливы, уровень быстро поднимался (со скоростью 10—30 *см/сутки*) и тут же срабатывался дреной. При таких «пиках» глубина доходила до 0,40—0,45 *м* от поверхности земли как вблизи дрен, так и в междреньях. Скорость опускания таких пиков составляла 5—16 *см/сутки* как вблизи дрен, так и в междреньях. После окончания поливов (в сентябре-октябре) уровень опускался со скоростью 2,3—4,2 *см/сутки* вблизи дрен и 0,7—2,7 *см/сутки* в междреньях.

Створ III—III. В невегетационный период глубина составляла 3,10—3,70 *м*. С начала мая наблюдался подъем уровня с максимумом в июле-августе. В местах интенсивных поливов в этот период грунтовые воды стояли на уровне 1,0—2,0 *м*, а на остальных участках на глубине 1,5—2,40 *м*. Скорость опускания «пиков» была равна 6—10 *см/сутки*, а снижение уровня после прекращения поливов —2,4 *см/сутки*.

Створ IV—IV. Глубина в невегетационный период — 3,10—3,70 *м*. Подъем уровня начался с поливами. Максимальный уровень наблюдался в июле-августе (глубина 1,20—2,50 *м*). Скорость опускания «пика» составила 9 *см/сутки*, а снижение уровня грунтовых вод после окончания вегетационных поливов — 1,6—3,6 *см/сутки*.

Кроме описанных створов имелся еще участок между дренами Д-6 и Д-7, на котором не было посевов и поливы не производились. Глубина грунтовых вод здесь находилась в пределах 3,70 (в июле-августе) — 4,20 *м* (в январе). Таким образом, в течение всего года, даже в период максимальных поливов на прилегающей территории, уровень грунтовых вод на указанном участке изменялся незначительно.

В 1960 г. уровень грунтовых вод колебался в основном в тех же пределах, а на некоторых участках, например в междреньях Д-4—Д-5 и Д-5—Д-6, уровень стоял выше, чем в 1958 г. на 0,5—0,6 *м*, что повлекло за собой увеличение расхода и длительности работы закрытых дрен.

Минерализация грунтовых вод как в 1959 г., так и в 1960 г. составила в основном 4—10 *г/л* плотного остатка, достигая в отдельных точках 15 и даже 19 *г/л*. Изменения минерализации грунтовых вод за двухлетний период работы дренажа не произошло.

Техническое состояние и работа закрытых дрен. За двухлетний период эксплуатации закрытых дрен не отмечалось разрушений, связанных непосредственно с работой и конструкцией дренажных устройств.

Таблица 4

Продолжительность работы закрытых дрен в 1959 — 1960 гг., сутки

Год	Дрена								
	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-6—2	Д-7	Всего
1959	129	108	176	103	29	51	0	184	780
1960	136	178	207	141	196	231	91	212	1392

Различные неполадки и аварийное состояние некоторых дрен были связаны с неправильным ведением строительных работ, имеющимися строительными дефектами и отсутствием службы эксплуатации. Даже в самые напряженные моменты работы закрытых дрен, когда расходы в устье достигали 25 *л/сек*, дренажная вода была чистой, что свидетельствовало о нормальном функционировании фильтрующей обсыпки.

Сток воды по закрытым дренам обычно начинался через несколько дней после пуска воды в оросительную систему, а прекращался через 1—2 мес. после ее закрытия. В 1959 г. дрены работали в основном в период с мая по октябрь, а в 1960 г. с мая по ноябрь, т. е. в 1960 г. продолжительность работы дрен была больше (табл. 4).

Расходы воды в закрытых дренах очень динамичны. В табл. 5 приведены среднемесячные и максимальные расходы воды в устьях закрытых дрен в 1959 г.

Максимальные расходы по дренам наблюдались в июле-августе, т. е. в период наиболее интенсивных поливов.

По дренам Д-2, Д-3, Д-4 и Д-7 максимальные расходы были выше расчетных, а по дренам Д-3 и Д-4 в августе даже средние расходы в 1,8 раза превышали расчетные. Среднемесячный расход по Д-4 в

Таблица 5

Расход воды (*л/сек*) в устьях закрытых дрен в 1959 г.

Месяц	Расход воды	Дрена						
		Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7
	Расчетный	7,0	8,0	7,0	8,0	10,0	11,0	6,0
Май	Средний	0,44	4,77	5,07	0	0	0,26	1,50
	Максимальный	0,50	10,0	8,65	0	0	—	3,59
Июнь	Средний	3,0	0	4,14	0	0	2,71	2,88
	Максимальный	—	0	7,19	0	0	5,25	4,26
Июль	Средний	3,0	4,31	11,15	12,0	0	1,33	5,33
	Максимальный	—	6,29	18,18	20,23	0	1,73	11,30
Август	Средний	2,5	5,0	12,5	14,65	4,08	0	6,19
	Максимальный	—	—	25,25	19,49	7,35	0	9,76
Сентябрь	Средний	1,5	4,5	4,86	10,4	1,58	0	3,96
	Максимальный	—	—	13,03	23,8	2,74	0	5,27
Октябрь	Средний	0	2,31	1,35	2,02	0	0	1,40
	Максимальный	—	6,0	3,86	7,10	0	0	4,20

Примечание. Знак „0" означает отсутствие воды в устье дрены, а прочерком указано, что расходы не замерялись.

Таблица 6

Расход воды (*л/сек*) в устье закрытой дрены Д-5 в 1960 г.

Расход	Месяц						
	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Средний	3,92	4,86	10,42	9,39	3,59	5,78	1,62
Максимальный	7,04	12,50	15,30	13,20	10,71	8,92	3,66

Таблица 7

Средняя минерализация дренажной воды в 1959 — 1960 гг. (плотный остаток, *г/л*)

Год	Дрена						
	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6	Д-7
1959	3,923	3,869	4,498	3,977	4,288	4,411	5,451
1960	3,970	4,168	4,587	4,153	4,526	4,508	5,343

августе составил 14,65 *л/сек*, а максимальный расход по Д-3—25,25 *л/сек*.

В 1960 г. расходы по дренам были несколько больше, чем в 1959 г. В табл. 6 показаны расходы по дрене Д-5 в 1960 г., а на рис. 3 представлен типичный график колебания расходов (на примере дрены Д-5).

Минерализация дренажной воды как в 1959 г., так и в 1960 г. колебалась в пределах 4,0—5,5 *г/л* плотного остатка. По отдельным дренам в течение всего периода работы дренажа минерализация изменялась очень незначительно (в пределах точности анализов), и какой-либо закономерности обнаружить не удалось.

Для сравнения минерализации дренажной воды в 1959 и 1960 гг. в табл. 7 приведены данные о средней (за сезон) минерализации дренажной воды по каждой дрене.

Из табл. 7 следует, что в 1960 г. минерализация дренажной воды во всех дренах (кроме Д-7) повысилась на 0,05—0,30 *г/л*, а по дрене Д-7— снизилась.

Связь между поливами и работой дренажной системы. Дренажный модуль. Для выявления связи между поливами и работой закрытых дрен подсчитывалось количество оросительной воды, поданной за вегетационный период, и количество воды, отведенной закрытым дренажом для площадей, подвешенных к отдельным дренам, и для всего участка (табл. 8).

Сток воды по дренам тесно связан с количеством оросительной воды. Всего за вегетационный период в 1959 г. на участок было подано 2356 тыс. $м^3$ оросительной воды, что составило 7980 $м^3/га$ валовой площади, или 12800 $м^3/га$ орошаемой площади. Отведено закрытым дренажом за этот же период 341 тыс. $м^3$ воды, т. е. 1156 $м^3/га$ валовой площади, или 1860 $м^3/га$ орошаемой.

Процент дренажной воды от оросительной в течение вегетационного периода все время возрастал, в августе-сентябре он достиг максимума (19,4—19,7%). По отдельным дренам количество дренажной воды за месяц составило 67% от оросительной (Д-4 в сентябре), а за весь период по отдельным дренам оно доходило до 33,1% (Д-4).

По всему участку при КЗИ, равном 0,62, и удельной протяженности дренажа (на валовую площадь) 20,4 *м/га* количество дренажной воды достигло 14,5% от оросительной.

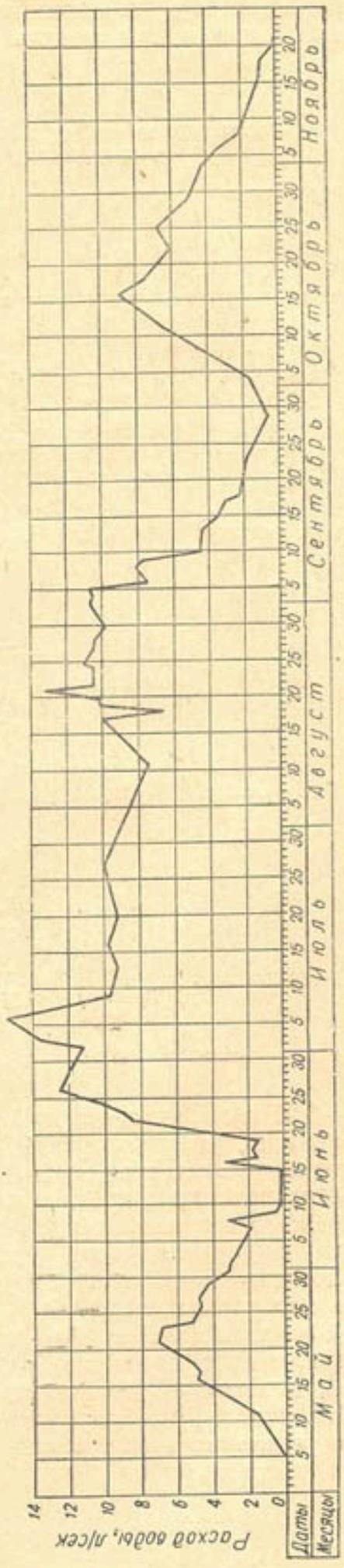


Рис. 3. График расходов воды по дрене Д-5 в 1960 г.

Значения дренажного модуля, подсчитанные по фактическим расходам и площадям, подвешенным к каждой дрене, представлены в табл. 9. Средний дренажный модуль по отдельным дренам был равен 0,05—

Таблица 8

Соотношение между поданной на участок оросительной водой и отведенной с участка дренажной водой

Дрена	Месяц						
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	За весь период
	Подано оросительной воды, *тыс. м³*						
Д-1	61,5	67,1	80,1	91,0	46,6	0	346,3
Д-2	79,0	86,5	103,2	117,2	60,0	0	445,9
Д-3	68,5	75,0	89,6	101,5	52,0	0	386,6
Д-4	53,0	57,79	69,2	78,5	40,2	0	298,69
Д-5	76,7	84,0	100,2	113,6	58,1	0	432,6
Д-6	48,4	52,9	63,1	71,6	86,7	0	272,7
Д-7	30,72	33,7	40,25	45,7	23,4	0	173,77
Всего по участку	417,82	455,99	545,65	619,1	317,0	0	2356,56
	Отведено закрытыми дренами, *тыс. м³*						
Д-1	1,055	7,77	8,035	6,65	1,295	0	24,54
Д-2	4,95	0	9,3	13,395	11,64	2,198	41,478
Д-3	12,26	10,72	29,9	33,472	11,72	3,083	101,105
Д-4	0	0	30,1	39,235	26,98	24,47	98,753
Д-5	0	0	0	10,886	0,684	0	11,570
Д-6	0,022	4,680	8,55	0	0	0	8,252
Д-7	2,725	7,460	14,27	16,502	10,23	3,752	54,939
Всего по участку	21,012	30,63	95,155	120,131	62,549	11,426	340,903
	Процент дренажной воды от оросительной						
Д-1	1,71	11,57	10,01	7,31	2,78	—	7,08
Д-2	6,25	—	9,0	11,4	19,4	—	9,3
Д-3	17,9	14,3	33,4	33,0	22,6	—	26,2
Д-4	—	—	43,5	50,06	67,0	—	38,1
Д-5	—	—	—	9,58	1,18	—	2,68
Д-6	0,04	8,85	5,63	—	—	—	3,03
Д-7	8,88	22,22	35,5	36,2	43,6	—	31,6
Всего по участку	5,03	6,7	17,4	19,4	19,7	—	14,5

0,15—0,27 *л/сек/га*, а средний по всем дренам —0,114 *л/сек/га*. Следует оговориться, что величина 0,114 *л/сек/га* занижена вследствие малой длины некоторых дрен, небольшого КЗИ (0,62), незаконченного строительства некоторых дрен, неточных замеров расходов по дренам Д-1 и Д-2. Наиболее реальным является средний дренажный модуль, подсчитанный по дренам Д-3 и Д-4, т. е. 0,17—0,27 *л/сек/га*.

Максимальный суточный дренажный модуль составил 0,73 *л/сек/га*, максимальный за месяц —0,45 *л/сек/га* (по Д-4 в августе).

Элементы солевого баланса. По имеющимся данным о фактической минерализации дренажной воды было подсчитано общее количество солей, вынесенных дренажной водой с территории опытного участка в 1959 г. (табл. 10). Закрытыми дренами за пределы опытного участка было вынесено 1496 *т* солей, т. е. 5,06 *т/га* валовой площади, или 8,15 *т/га* орошаемой.

Следует отметить, что указанные величины занижены (как и величина среднего дренажного модуля, о чем указывалось выше) и для расчетов необходимо учитывать вынос солей дренами Д-3 и Д-4, т. е. 12—13 *т/га*.

Таблица 9

Дренажный модуль в 1959 г.

Дрена	Дренажный модуль, *л/сек/га*						
	месяц						средний за сезон
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Д-1	0,013 / 0,015	0,088 / —	0,088 / —	0,074 / —	0,044 / —	0 / —	0,061 / —
Д-2	0,133 / 0,278	0 / 0	0,120 / 0,175	0,139 / —	0,125 / —	0,064 / 0,166	0,116 / —
Д-3	0,101 / 0,173	0,083 / 0,144	0,32 / 0,52	0,357 / 0,721	0,139 / 0,372	0,039 / 0,11	0,173 / 0,721
Д-4	0 / 0	0 / 0	0,24 / 0,405	0,45 / 0,6	0,32 / 0,73	0,062 / 0,218	0,268 / 0,730
Д-5	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0,074 / 0,133	0,0286 / 0,05	0 / 0	0,052 / 0,133
Д-6	0,01 / —	0101 / 0,197	0,05 / 0,065	0 / 0	0 / 0	0 / 0	0,053 / 0,197
Д-7	0,033 / 0,078	0,062 / 0,092	0,115 / 0,244	0,134 / 0,212	0,086 / 0,114	0,03 / 0,091	0,077 / 0,244

Примечание. В числителе дан средний за месяц дренажный модуль, а в знаменателе — максимальный суточный.

Для определения количества солей, приносимых на поля с оросительной водой, из канала М-1 через каждые 2 *км* по всей его длине несколько раз за сезон в 1959 г. и 1960 г. отбирались пробы для анализа на засоление. Определялось содержание плотного остатка хлора и SO_4. Результаты анализов показали, что изменения минерализации по 20-километровой длине канала не происходит, но в течение оросительного сезона содержание солей в поливной воде все время возрастает, достигая максимума в конце поливов (в октябре).

Содержание плотного остатка по месяцам характеризуется следующими цифрами: в мае — 0,53 *кг/м*^{3}, июне — 0,53, июле — 0,60, августе — 0,60, сентябре — 0,72, октябре — 0,75 *кг/м*^{3}.

Имея данные о содержании солей в почвогрунтах в 1958 г. и 1960 г. и учитывая, что на каждый гектар валовой площади (на примере дрен Д-3 и Д-4) было подано за сезон в среднем 10000 *м*^{3} оросительной воды со средней минерализацией 0,6—0,7 *кг/м*^{3} и что вынос солей с дренажной водой составил 12—13 *т/га*, можно сделать ориентировочные подсчеты солевого баланса. Произведенный подсчет показал, что за один год с каждого гектара площади, подвешенной к дренам Д-3 и Д-4, из верхнего метрового слоя удалялось около 25 *т* солей (по плотному остатку), причем 25—30% этого количества составляли соли, поступившие с оросительной водой. С дренажной водой было вынесено около 50% (12—13 *т*), а остальное количество поступило в нижние слои.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведенные исследования подтвердили возможность применения закрытого дренажа для улучшения мелиоративного состояния целинных земель Голодной степи.

2. Глубина грунтовых вод на опытном участке в поливной период в среднем составила 1,7—2,0 *м*. При интенсивных поливах на отдельных участках наблюдался быстрый подъем уровня (со скоростью 10—30 *см/сутки)* грунтовых вод и глубина их доходила до 0,40—0,45 *м* от поверхности земли. Такие «пики» срабатывались со скоростью 5—16 *см/сутки*.

Таблица 10

Количество солей, отведенных с дренажной водой за пределы опытного участка

Дрена	Вынесено солей (по плотному остатку) каждой дреной, *т*							
	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	за весь сезон	с 1 *га* валовой площади за сезон
Д-1	4,34	31,90	28,80	26,45	5,05	0	96,54	2,84
Д-2	19,84	0	41,30	49,60	41,75	7,93	160,42	4,45
Д-3	49,25	45,6	137,5	161,50	56,4	14,57	464,82	13,25
Д-4	0	0	127,2	162,80	102,5	9,13	401,63	12,35
Д-5	0	0	0	40,65	0,33	0	40,98	0,736
Д-6	0,097	20,5	15,75	0	0	0	36,35	1,97
Д-7	15,75	41,22	71,65	93,45	54,00	19,13	295,20	6,38
По всему участку	89,28	139,22	422,2	534,45	260,03	50,76	1495,93	5,06

После прекращения вегетационных поливов наблюдалось общее снижение уровня со скоростью 2,0—4,0 *см/сутки*.

3. На фоне закрытого дренажа за двухлетний период под влиянием вегетационных поливов произошло рассоление верхнего 3-метрового слоя почвогрунтов, вследствие чего они перешли из категории засоленных и сильнозасоленных в категорию слабозасоленных (по содержанию хлора). Однако без специальных промывных поливов этот процесс происходит медленно и в верхнем полуметровом слое сохраняется значительное количество солей. Промывки позволят за 1—2 года полностью рассолить корнеобитаемый слой.

4. В сложившихся условиях дрены работали только в вегетационный период, что объясняется дренирующим влиянием русла ЮГК и малым КЗИ (0,62). При заполнении ЮГК оросительной водой и повышении КЗИ до проектного (0,85) следует ожидать удлинения сроков действия дрен.

5. Количество воды, отводимое закрытым дренажом, зависит от количества поданной на участок оросительной воды. В среднем закрытыми дренами в 1959 г. было отведено 14,5% оросительной воды. Учитывая роль ЮГК и малый КЗИ, можно ожидать увеличения этой величины до 30—40% (по опыту работы дрен Д-3 и Д-4).

6. Расходы по закрытым дренам очень динамичны. Фактические расходы значительно превышают расчетные (в 2—3 раза). Максимальный расход составил 25,25 *л/сек*.

7. Средний дренажный модуль за сезон был равен 0,114 *л/сек* с 1 *га* по всему участку. В дальнейшем при заполнении ЮГК и увеличении КЗИ при удельной протяженности дренажа 25—30 *пог. м/га* можно ожидать, что дренажный модуль увеличится до 0,3—0,4 *л/сек* с 1 *га* или 0,0003—0,0004 *л/сек* с 1 *га* на 1 *пог. м* закрытых дрен. Суточный дренажный модуль может быть в 2 раза выше.

8. Минерализация дренажной воды по каждой дрене практически оставалась все время постоянной как в течение оросительного сезона, так и за 2-летний период работы дрен и составляла 4—6 *г/л*. Изменения минерализации грунтовой воды также не отмечалось.

9. Принятая конструкция дрен и фильтра показала удовлетворительную работу их. В течение двухлетнего периода не было разрушений, связанных с работой закрытых дрен и конструкций дренажных устройств. В 1960 г. закрытый дренаж на опытном участке работал более длительный срок и интенсивнее, чем в 1959 г.

10. В условиях опытного участка принятые междренные расстояния (300—500 *м*) и глубина дрен (2,5—3,5 *м*) оказались достаточными.

11. Дреноукладчики, использованные при строительстве закрытых дрен, достаточно эффективны. Их необходимо применять в дальнейшем строительстве закрытых дрен.

12. Совершенно недопустимо, что закрытые дрены до сих пор не переданы службе эксплуатации совхоза. Отсутствие надлежащего надзора за дренами приводит к постоянному разрушению их дикими сбросами оросительной воды.

На основании трехлетних наблюдений за строительством, техническим состоянием и работой закрытых дрен можно дать некоторые рекомендации по проектированию и строительству закрытых дрен.

1. Обязательно следует устраивать фильтрующую обсыпку по всему периметру и длине дрен. Положительная роль ее заключается в следующем:

а) увеличивается площадь высачивания грунтовой воды в дрену;

б) создаются нормальные условия фильтрации воды из грунта в дрену, предотвращается вымыв частиц грунта и образование каверн, ведущих к разрушению дренажной линии;

в) достигается высокая точность укладки труб любой длины и прочное ложе под трубами, что дает гарантию длительной и надежной работы дрен;

г) в случае аварии и закупорки дренажной трубы вода может обходить аварийное место по гравийному фильтру, а затем опять собираться в трубу. Следовательно, даже в случае аварии дрена может работать и отводить воду до тех пор, пока не отремонтируют аварийный участок (такой опыт имеется по дрене Д-3).

В процессе исследований было установлено, что депрессионные кривые зачастую не подходят непосредственно к дрене (фильтру), а лишь несколько снижаются над ней, таким образом вода поступает в дрену по всему периметру фильтрующей обсыпки.

2. Для фильтрующей обсыпки следует применять гравий более однообразного состава (с преобладанием частиц размером 10—20 *мм*), не допуская частиц крупнее 30 *мм*. В этом случае можно уменьшить размеры фильтра, приняв толщину под трубами 10—15 *см*, а над трубами —8—10 *см*. Уменьшить количество гравия для фильтрующей обсыпки можно также за счет изменения формы дна траншеи, устраивая его не прямоугольным, а полукруглым, для чего следует изменить форму ковшей траншейного экскаватора .

3. Учитывая необходимость использования под посевы наддренных полос, а также возможность попадания на них сбросной оросительной воды, следует принимать меры против образования в траншее ходов прямой фильтрации воды в дрену, что ведет к разрушению и заилению фильтра и самой дрены. Это может быть достигнуто следующими способами:

а) послойным уплотнением грунта с надлежащим увлажнением его при обратной засыпке траншей;

б) устройством антифильтрационного экрана, для чего перед засыпкой траншеи фильтрующая обсыпка по всей длине дрены накрывается лентой из водонепроницаемого материала по ширине траншеи. Материалом для такой ленты может служить полиэтиленовая пленка; ткань и плотная бумага, пропитанные битумом; толь и рубероид; битумная пленка; смесь битума с песком, грунтом и т. д.

Выбор того или иного способа должен определяться технико-экономическим подсчетом, условиями механизации и наличием материалов.

4. При отсутствии уплотнения и антифильтрационного экрана следует предусматривать устройства для предотвращения попадания оросительной воды в дренажную траншею в первые 2—3 года после постройки дрен. Это может быть достигнуто:

а) устройством защитных дамбочек высотой 0,5 *м* с обеих сторон дрены (на расстоянии 3—5 *м* от оси дрены);

б) устройством вместо дамбочек защитных канав; в этом случае должен быть предусмотрен сброс воды из канав в коллектор или дрену;

в) профилированием наддренных полос грейдером (по аналогии с профилированием дорожного полотна) с подсыпкой грунта из кюветов и уплотнением его гусеницами трактора или катком.

Выбор того или иного способа должен определяться наличием механизмов.

В дальнейшем, через 2—3 года, наддренные полосы могут быть спланированы и использованы для посевов.

5. Для предотвращения образования пристенной фильтрации необходимо обрушивать вертикальные стенки траншей при обратной засыпке или создавать искусственную шероховатость на них.

6. Желательно применять на дренах только два типа колодцев: смотровые — диаметром 800—1000 *мм* и наблюдательные — диаметром 100—150 *мм*. Расстояния между смотровыми колодцами должны быть 300—500 *м*, а между наблюдательными (включая смотровые) — 50—100 *м*. Глубину отстойника в смотровых колодцах следует принимать 40 *см*, предусмотрев возможность установки водомерных устройств. Контрольные колодцы принятой конструкции строить не следует. Соединения дренажных труб со смотровыми и наблюдательными колодцами необходимо заделывать наглухо с применением бетона.

7. Устья дрен должны обладать водомерными свойствами, удобнее всего заканчивать консоль конической насадкой. Оправдала себя отмостка рваным камнем откоса и дна открытого коллектора в устье дрены и ее следует применять.

8. Длину звеньев дренажных труб можно увеличить в два раза, т. е. до 60—70 *см*.

9. Необходимо отказаться от использования асбоцементных труб для существующих дреноукладчиков, так как для этого необходимо целые трубы резать на звенья по 33 *см*, что удорожает стоимость работ.

Следует применять готовые звенья труб тех же размеров из другого материала, выпускаемые промышленностью, в частности, гончарные.

Необходимо создать дреноукладчик для укладки труб разной длины (3—4 *м*) и диаметров.

10. При передаче построенных дрен службе эксплуатации, для введения паспортизации закрытых дрен и проведения нужных исследований по каждой дрене должны быть своевременно подготовлены документы:

а) исполнительный профиль дрены с указанием отметок земли, верха фильтрующей обсыпки, верха трубы и дна траншеи. Исполнительный профиль должен вычерчиваться на основании нивелировки по трубам через каждые 10 *м* перед засыпкой траншеи. К исполнительному профилю должен быть приложен нивелировочный журнал;

б) поперечное сечение дрены с указанием размеров траншеи, трубы и фильтра;

в) конструкция дрены (материал и размеры труб; количество, форма и расположение отверстий в трубе);

г) конструкция смотровых, контрольных и наблюдательных колодцев на дрене;

д) конструкция устья дрены;

е) гранулометрический состав фильтрующей обсыпки (по данным анализа лаборатории).

СОДЕРЖАНИЕ

З. И. Рядова. К расчету водослива с широким порогом 5
Р. В. Тимирова. Совмещенная схема водозабора ферганского типа с донной решеткой 12
Р. А. Алимухамедов. К вопросу о внутрисистемных отстойниках. . 20
К. А. Авлянова. Об улучшении управления водораспределением на оросительных каналах 27
А. Умаров. Наблюдения за водным балансом на Маргеланской системе. . 62
Г. А. Ахмедов. Некоторые результаты исследований по определению потерь воды на испарение и транспирацию в бассейне реки Сыр-Дарья 67
Х. Якубов. Конструкция пьезометров и устранение недостатков в их работе. 77
И. Б. Хамадов. Истечение воды из-под затворов с плавнообтекаемыми очертаниями нижней части обшивок или козырьков 84
И. Б. Хамадов. Лабораторное подтверждение расчета гидродинамических, сил, действующих на затвор-автомат. 97
А. А. Гартунг. Лабораторные исследования моделей гидравлических автоматов верхнего бьефа типа фирмы Нейрпик . . . 104
А. Г. Еременков. Шнуровые водоподъемники для водоснабжения из скважин на пастбищах отгонного животноводства. . . . 112
Б. И. Минкевич. Влияние вибрирования и различных заполнителей на качество пластобетона на мономере ФА 118
Ю. М. Кузьминов. О критерии устойчивости частиц на русловом откосе из несвязных грунтов 124
Л. П. Зайцев. Сопротивление грунта резанию ротационным рабочим органом каналоочистителя 133
В. А. Барон. Неустановившийся приток подземных вод к скважине вертикального дренажа 141
В. А. Барон. Определение общего дебита системы скважин вертикального дренажа 152
Э. И. Гринев. Применение закрытого горизонтального дренажа на целинных землях Голодной степи 157

Редакторы *А. А. Соколова*, *К. А. Шафеева*
Технический редактор *Х. У. Карабаева*
Корректоры *Р. О. Андронова*, *М. Р. Нуратдинова*

Р-00165 Сдано в набор 5/VIII-61 г. Подписано к печати 17/X—61 г.
Бумага 70×108 1/16=5,30 бум. л. 10,62 печ. л. Учёт. изд. л. 14,62 Изд № 293/61
Тираж 650 Цена 1 р. 28 к. Переплет 15 к.

Типография Издательства АН УзССР, Ташкент, Хорезмская, 9. Заказ № 937
Адрес Издательства: ул. Куйбышева, 15.