А.Г. ХАЧАТРЯН
Х.Ш. ШАПИРО
З.И. ШАРОВА

Заиление и промыв ирригационных отстойников и водохранилищ



А. Г. ХАЧАТРЯН, Х. Ш. ШАПИРО,
З. И. ШАРОВА

заиление и промыв ирригационных отстойников и водохранилищ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «КОЛОС»
Москва — 1966

УДК 626.81 : 628.334.1

От издательства

В книге изложены методы расчета заиления и промыва отстойников, русловых и озерных водохранилищ; представлены результаты исследований этих процессов в натурных и лабораторных условиях; приведены рекомендации по борьбе с заилением водохранилищ, рассмотрены некоторые частные случаи влияния водохранилища, сооружаемого на притоке, на русловой режим основной реки и другие вопросы.

Книга рассчитана на инженеров-гидротехников, занимающихся проектированием и эксплуатацией водозаборных узлов, отстойников и водохранилищ, а также на научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

Параграфы 1, 3—15 и 28 книги составлены доктором технических наук А. Г. Хачатряном, им же выполнена общая редакция книги; 2 и 16—25 написаны кандидатом технических наук Х. Ш. Шапиро, 26—27 — кандидатом технических наук З. И. Шаровой.

Отзывы о книге и пожелания просим посылать по адресу: Москва К-31, ул. Дзержинского, 1/19, издательство «Колос».

3—2—11
167—66

Введение

В Советском Союзе ежегодный объем очистки оросительных систем от заиления составляет более 150 млн. $м^3$, из которых около 100 млн. $м^3$ приходится на хлопковые районы [24].

Защита оросительных каналов от заиления осуществляется по трем направлениям:

1) донные и крупные взвешенные наносы не допускают в каналы;

2) мелкие взвещенные наносы транспортируют на орошаемые земли;

3) наносы, которые не могут быть транспортированы на орошаемые земли, осаждают в отстойниках, а затем удаляют из них механизмами или гидравлическим способом.

В условиях бесплотинного водозабора наиболее надежным средством для защиты каналов от донных и крупных взвешенных наносов являются струенаправляющие системы, разработанные во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова (ВНИИГиМ) на основе предложенного проф. М. В. Потаповым метода искусственной поперечной циркуляции [31].

Струенаправляющими системами оборудованы оросительные каналы Таш-Сака, Кыз-Кеткен, Каракумский, Клыч-Нияз-Бай, Кипчак-Бозсу, Пахта-Арна на р. Аму-Дарье. Затраты средств на использование струенаправляющих систем в 10—12 раз меньше, чем на очистку каналов землесосами.

При плотинном водозаборе донные и придонные наносы не допускают в канал, создавая в потоке поперечную циркуляцию путем искусственного искривления его в плане. Наиболее широко распространены водозаборные узлы с искусственным искривлением участка реки, примыкающего к плотине, и с расположением водозаборного сооружения с промывной галереей в пороге на вогнутом берегу (Ферганский тип водозабора) [2]. По такому типу построены Кампыр-Раватский, Сары-Курганский, Туполанг-ский, Ангренский, Кугартский и другие плотинные узлы. По данным эксплуатации Кампыр-Раватского сооружения, такая конст-

рукция водозаборного узла обеспечивает сброс через плотину 94—96% общего количества влекомых наносов.

На горных и предгорных участках рек применяют конструкцию водозаборных узлов с наносоперехватывающими галереями, предложенную проф. Н. Ф. Данелия и канд. техн. наук К. Г. Липатовым, разработанную научно-исследовательским институтом гидротехники и мелиорации Грузинской ССР [12]. Принцип работы этого узла сооружений также основан на использовании поперечной циркуляции, которая возникает в потоке при боковом отводе воды.

Для осаждения нетранспортируемых потоком наносов с последующей механической очисткой или промывкой устраивают головные и внутрисистемные отстойники.

При бесплотинном водозаборе и размываемых берегах реки головные отстойники располагают перед сооружениями, а при устойчивых берегах — за ними. Для того чтобы не увеличивать осветление потока в головных отстойниках, что приводит к затруднениям в эксплуатации, сокращению количества транспортируемых на орошаемые земли мелких наносов, а иногда и к размывам на крупных магистральных каналах, в начале распределительных каналов устраивают внутрисистемные отстойники. В этих отстойниках поток дополнительно осветляется.

Потребное осветление потока в отстойниках определяют в зависимости от транспортирующей способности (критической мутности) потока в каналах, защищаемых от заиления.

Оросительные системы с бесплотинным водозабором в большинстве случаев имеют однокамерные отстойники, представляющие собой расширенные и углубленные участки каналов. Длина головных отстойников 0,5—3,0 *км*, внутрисистемных 0,3—1,0 *км*. Очищают их от накопившихся наносов машинами, главным образом плавучими землесосными установками.

При плотинном водозаборе обычно устраивают многокамерные отстойники с промывкой. Такие отстойники построены на головных узлах Баграм-Тапинской, Чуйской, Мало-Кабардинской, Терско-Кумской и других оросительных системах.

На ряде оросительных систем для осветления воды используют естественные понижения (отстойники озерного типа), например Келифские озера на трассе Каракумского канала в Туркменской ССР, озерные отстойники оросительных систем в Таджикской ССР.

В связи со строительством большого количества гидроузлов с водохранилищами нарушается бытовой режим твердого стока рек, интенсивно заиляются верхние бьефы и размывается русло ниже сооружений.

Как показывает опыт эксплуатации водохранилищ на реках, несущих большое количество взвешенных и донных наносов, такие водохранилища быстро и неравномерно заиляются, что резко

сокращает полезную емкость и срок их службы. Заиление водохранилищ, в свою очередь, приводит к подъему уровня воды и передвижению места выклинивания кривой подпора воды в верхнем бьефе.

Проводившиеся исследования водохранилищ и верхних бьефов гидроузлов в нашей стране и за рубежом относятся главным образом к определению сроков заиления, а в предлагаемых методах расчета применяются условные характеристики состава наносов.

Существующие методы расчета транспортирующей способности потока, заиления и промывки отстойников, верхних бьефов гидроузлов и водохранилищ, а также общего размыва русел рек ниже гидроузлов основаны на применении характеристики состава наносов в виде условной величины средней гидравлической крупности (или среднего диаметра) частиц, вследствие чего имеют ограниченные области применения.

В 1953—1956 гг. во ВНИИГиМе доктор техн. наук А. Г. Хачатрян разработал метод расчета незаиляемых каналов и отстойников, основанный на закономерности в распределении по крупности насыщающих поток наносов. Этот метод по сравнению с другими имеет более широкую область применения и позволяет выполнять расчеты с близкими к действительности результатами. С использованием указанной закономерности в последние годы предложены методы расчета промыва отстойников, заиления и размыва русел, заиления верхних бьефов гидроузлов, водохранилищ и отстойников озерного типа.

В настоящей работе изложены результаты проверки метода расчета осаждения наносов и рекомендации по проектированию ирригационных отстойников; методика расчета промыва отстойников; заиление и промыв русловых водохранилищ и закономерности заиления озерных отстойников.

Основные выводы и предложения составлены по материалам исследований, проведенных в полевых условиях коллективом сотрудников гидротехнической лаборатории ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова (научный руководитель темы А. Г. Хачатрян). В число этих работ входят.

1. Исследования закономерностей заиления и промыва отстойника на канале Куль-Арык, проведенные в 1940—1945 гг. под руководством и при непосредственном участии доктора техн. наук А. Г. Хачатряна [23].

2. Исследования закономерностей осаждения наносов на крупномасштабной модели отстойника в голове Каракумского канала, выполненные канд. техн. наук Х. Ш. Шапиро в 1957—1958 гг.

3. Исследования закономерности промыва крупномасштабной модели отстойника в голове Каракумского канала, проведенные канд. техн. наук Г. А. Тер-Абрамянцем в 1957—1958 гг.

4. Исследования динамики осаждения наносов в подводящих каналах-отстойниках Каракумского канала и струенаправляющей системы, не допускающей донные наносы в канал, выполненные под руководством и при непосредственном участии Х. Ш. Шапиро в 1955—1959 гг.

5. Исследования закономерности заиления первого Теджен-ского водохранилища, проведенные в 1960—1962 гг. под руководством и при участии Х. Ш. Шапиро.

6. Исследования закономерности заиления озерных отстойников на трассе Каракумского канала, проведенные канд. техн. наук З. И. Шаровой в 1957—1961 гг.

7. Исследования заиления и промыва наносных отложений многокамерного отстойника Баграм-Тапинского гидроузла, проведенные аспирантами А. Г. Нацвлишвили [18] и Ч. Г. Нуриевым в 1960—1961 гг.

8. Исследования общего размыва русла реки Теджен ниже водохранилищ, выполненные инженером Б. К. Балакаевым в 1957—1963 гг.

9. Исследования заиления и промыва отложений на модели верхнего бьефа Кизыл-Аякского гидроузла, а также распространения кривой подпора, проведенные в 1963—1964 гг. Х. Ш. Шапиро.

В указанных исследованиях принимали также участие инженеры И. Я. Долотказин, А. И. Соловьева, Ю. А. Клинов, Е. Г. Лопатин, К. П. Журавлева, Г. Я. Чеснин, ст. техники К. И. Терехина, Ф. Г. Галиев, техник Н. И. Ерхова и др.

В книге использован материал исследований и других авторов по этим вопросам.

Рецензии с ценными замечаниями по всему труду или по отдельным его разделам дали действительный член АН Узб. ССР В. В. Пославский, профессора С. Х. Абальянц, Ц. Е. Мирцхулава и М. С. Вызго, канд. техн. наук Г. А. Тер-Абрамянц, доценты В. В. Фандеев и С. И. Кобек-Медзелиц.

При составлении и подготовке работы к печати оказали помощь канд. техн. наук Г. А. Тер-Абрамянц, инж. А. И. Соловьева, ст. техник К. И. Терехина.

Всем товарищам авторский коллектив выражает благодарность.

Глава I

Осаждение наносов в отстойнике

§ 1. Сущность предлагаемого метода расчета осаждения наносов в отстойнике

Успех применения мероприятий по борьбе с заилением оросительных систем во многом зависит от правильного расчета режима наносов в них, транспортирующей способности потока в каналах и осаждения наносов в отстойниках.

Количество наносов, которые может транспортировать поток, зависит не только от его структуры и гидравлических элементов, но и от состава, формы частиц и свойств наносов. Вывод общего выражения для определения величины транспортирующей способности с учетом разнообразных условий формирования наносного режима представляет большие трудности, что заставляет искать решения, относящиеся к более конкретным режимам насыщения потока. Этим и объясняется наличие большого числа формул транспортирующей способности потока.

Вместе с тем опыт эксплуатации оросительных каналов показал, что некоторым из формул присущи большие недостатки, а другие имеют ограниченную область применения. Основная причина этого в том, что состав наносов в этих формулах или вовсе не принимают во внимание, или учитывают только через условную величину средней гидравлической крупности наносов $\overline{w}_0$.

Среднюю гидравлическую крупность полного состава наносов определяют по формуле:

$$\overline{w}_0 = \sum_{i=1}^{i=n} \overline{w}_i \rho_i \ м/сек, \qquad (1)$$

где n — число фракций;

ρ_i — удельное содержание фракций $\sum_1^n \rho_i = 1$;

$\overline{w}_i$ — средняя гидравлическая крупность этой фракции.

Величину $\overline{w}_i$ А. А. Черкасов и Е. А. Замарин рекомендуют определять по зависимости:

$$\overline{w}_i = \frac{w_i + w_{i+1} + \sqrt{w_i w_{i+1}}}{3} \ м/сек. \qquad (2)$$

Эту же величину А. Н. Гостунский предложил определять по формуле [1, 25]:

$$\bar{w}_i = \frac{3w_i + w_{i+1}}{4} \text{ м/сек.} \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) w_i — наименьшая, w_{i+1} — наибольшая гидравлическая крупность частиц фракции i.

При нарастании i от мелких фракций к крупным и при делении наносов на n фракций обозначение наименьшей гидравлической крупности будет $w_1 (i=1)$, а наибольшей $w_{n+1} \cdot (i=n)$.

Многолетние исследования на Аму-Дарьинских оросительных системах показали, что средняя гидравлическая крупность наносов недостаточно характеризует гранулометрический состав наносов. Поэтому включение $\bar{w}_0$ в формулы транспортирующей способности потока не дает общего удовлетворительного решения.

Из формулы (1) следует, что одну и ту же величину средней гидравлической крупности наносов можно получить для различного их состава как с постоянными, так и с переменными значениями w_1 и w_{n+1}. Для примера в таблице 1 приведены три образца наносов с различным составом. При определении значения w_i по формуле (2) средняя гидравлическая крупность для всех трех образцов составляет 1,65 *мм/сек*.

ТАБЛИЦА 1

Фракционный состав образцов наносов

Образцы наносов	Удельное содержание наносов отдельных фракций p_i с предельными гидравлическими крупностями w_i и w_{i+1}, *мм/сек*				
	0,04—0,09	0,09—0,21	0,21—2,27	2,27—6,63	6,63—26,0
1	0,143	0,195	0,478	0,156	0,028
2	0,38	0,25	0,20	0,11	0,06
3	—	0,25	0,50	0,25	—

На величину средней гидравлической крупности $\bar{w}_0$ оказывает большое влияние порядок деления наносов на фракции и способ определения $\bar{w}_i$. Например, для первого образца наносов при делении их на пять и три фракции по формуле (2) $\bar{w}_0$ составляет 1,65 и 2,85 *мм/сек*, а по формуле (3) — 1,22 и 1,95 *мм/сек*.

Таким образом, использование средней гидравлической крупности $\bar{w}_0$ в качестве характеристики состава наносов при постоянных гидравлических элементах потока может дать одинаковую величину транспортирующей способности потока для различного состава наносов и наоборот — различную транспортирующую способность для одного и того же состава наносов.

Во ВНИИГиМе разработан метод расчета транспортирующей способности потока и осаждения наносов в отстойниках без ис-

пользования величины средней гидравлической крупности. Предлагаемый метод наиболее полно учитывает состав насыщающих поток наносов. Сущность его подробно изложена в книге Хачатряна [23]. Здесь лишь кратко приводятся основные положения этого метода.

Поток воды воздействует на каждую отдельную частицу наносов. Частица наносов, гидравлическая крупность которой равна w, взвешена в потоке, если она находится в объеме воды, перемещающимся вверх со скоростью $u=w$. Эта частица движется вверх, если $u>w$ или вниз при $u<w$. Поэтому можно считать, что для транспортирования наносов наиболее полное использование энергии перемещающихся вверх объемов воды имеет место, когда эти объемы насыщены наносами с гидравлической крупностью w, равной их вертикальной составляющей скорости u.

Многочисленные наблюдения показывают, что на реках распределение взвешенных наносов по крупности имеет определенную закономерность. Для примера на рисунке 1 приведен график распределения взвешенных наносов на р. Аму-Дарье, где относительная мутность определена как средняя в пределах фракции по формуле:

$$j_{0i} = \frac{\rho_{0i}}{w_{i+1} - w_i} \frac{кг/м^3}{м/сек}, \quad (4)$$

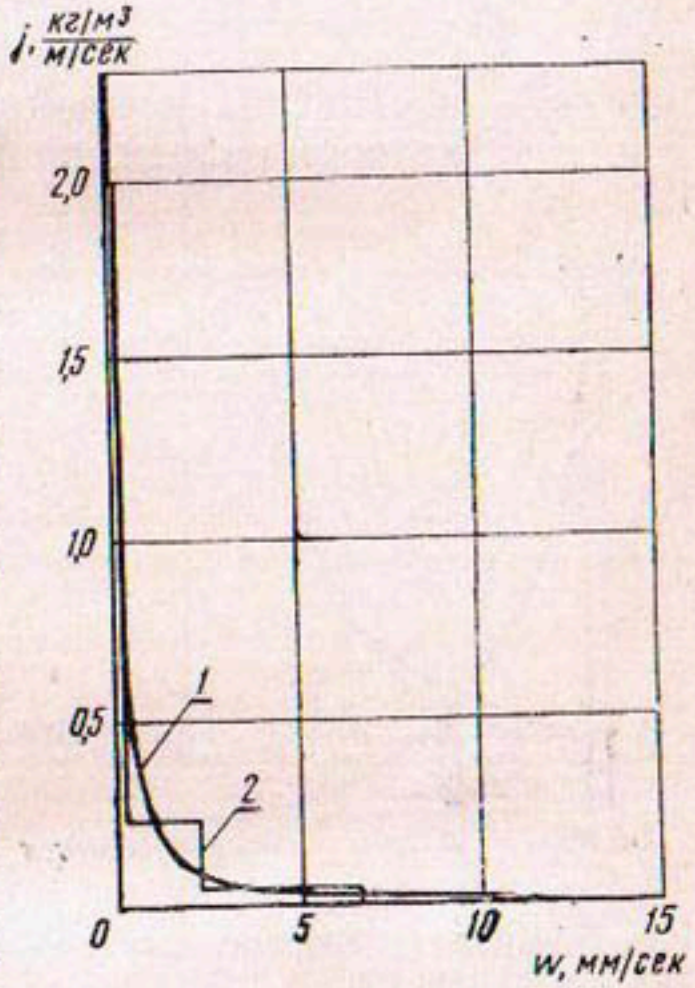


Рис. 1. График распределения взвешенных наносов рек по крупности:

$1 - j_0 = c_0\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}}\right)$; 2 — данные натуры.

в которой ρ_{0i} — весовое количество наносов фракций i с предельными крупностями w_i и w_{i+1}.

Из графика видно, что весовое количество отдельных фракций наносов с уменьшением гидравлической крупности резко возрастает.

Если обозначить весовое количество наносов, приходящихся на единицу гидравлической крупности, через j_0, то связь между этой величиной и гидравлической крупностью наносов w можно представить в виде:

$$j_0 = c_0\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}}\right) \frac{кг/м^3}{м/сек}. \quad (5)$$

Полная мутность потока воды источника ρ_0 составляет (рис. 2):

$$\rho_0 = \int_{w_1}^{w_{n+1}} j_0\, dw = c_0 \int_{w_1}^{w_{n+1}} \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}}\right) dw =$$

$$= c_0 \left(\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}\right) кг/м^3, \qquad (6)$$

где c_0 — постоянная кривой распределения наносов, значение которой находят по формуле:

$$c_0 = \frac{\rho_0}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}} кг/м^3. \qquad (7)$$

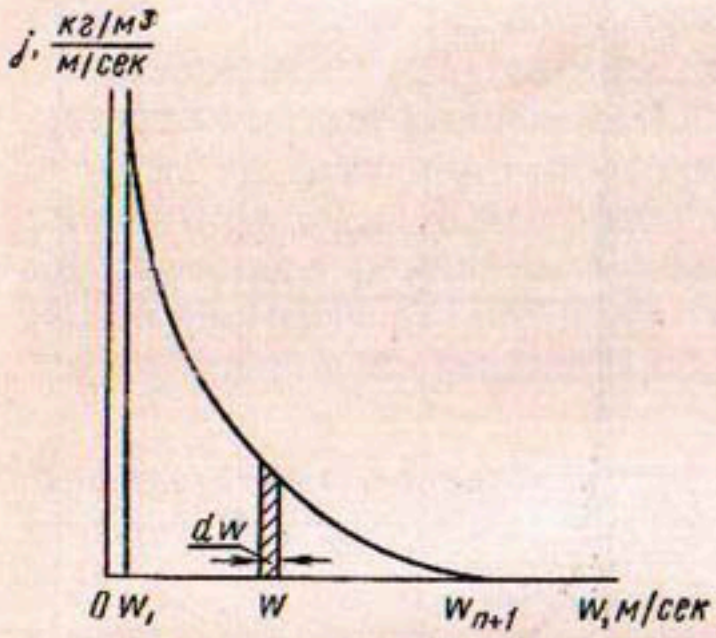


Рис. 2. Кривая распределения по крупности наносов.

Значения наименьшей и наибольшей гидравлических крупностей w_1 и w_{n+1} определяются по фракционному составу наносов, при делении их на три фракции, пользуясь формулой:

$$\rho_i = \frac{\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{w_{n+1}}}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}}. \qquad (8)$$

При полном насыщении потока наносами постоянная кривой распределения c_0 достигает своего наибольшего значения $c_т$, а состав наносов характеризуется минимальной гидравлической крупностью w_1 и максимальной $w_{n+1} = u_в$; мутность потока соответствует его транспортирующей способности. Обозначив мутность через $\rho_т$, на основании (6) можно написать:

$$\rho_т = c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_1} - \frac{u_в - w_1}{u_в}\right) кг/м^3, \qquad (9)$$

где $u_в$ — наибольшая взвешивающая скорость потока, которая определяется по формуле:

$$u_в = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\, i^{1/4} \ м/сек, \qquad (10)$$

а значение $c_т$, как первое приближение, можно определить:

$$c_т = 200\, u_в \ кг/м^3. \qquad (11)$$

Проверка формулы транспортирующей способности потока на натурных данных, соответствующих широкому диапазону гидравлических параметров потока, показала удовлетворительное совпадение расчетных данных с натурными.

Формула (9) определяет полное значение транспортирующей способности потока при насыщении его всеми крупностями наносов в пределах $w_1 - u_в$, но в большинстве случаев речные потоки не насыщены наносами.

При поступлении воды из реки в каналы или отстойники, транспортирующая способность которых значительно меньше, в них образуется избыток наносов $\rho_н$, которые осаждаются. Этот избыток состоит из более крупных частиц с наименьшей гидравлической крупностью (рис. 3):

$$w_x = \frac{c_т - c_0}{\frac{c_т}{u_в} - \frac{c_0}{w_{n+1}}} \text{ м/сек}, \qquad (12)$$

а величина избыточной мутности, показанной на рисунке 3 заштрихованной площадью, составляет:

$$\rho_н = c_0 \left(\ln \frac{w_{n+1}}{w_x} - \frac{w_{n+1} - w_x}{w_{n+1}} \right) - c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в} \right) \text{ кг/м}^3. \qquad (13)$$

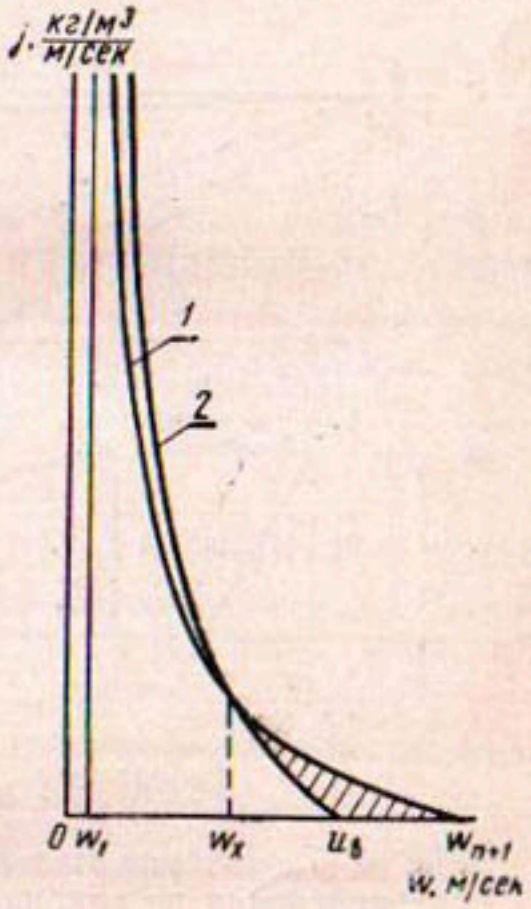


Рис. 3. Кривые зависимости j_0 и $j_т$ от w:
$1 - j_0 = c_0 \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}} \right)$;
$2 - j_т = c_т \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_в} \right)$.

При $w_x \leqslant w_1$ избыточное количество наносов включает частицы всех крупностей начальной мутности.

После осаждения избытка наносов в канале или отстойнике во взвешенном состоянии остается та их часть, которую поток в состоянии транспортировать. При значении $w_1 < w_x$ количество наносов зависит не только от транспортирующей способности потока, но и от весового количества и состава начальной (речной) мутности. Это соответствует критической мутности потока $\rho_{кр}$ и определяется при помощи равенства:

$$\rho_{кр} = c_0 \left(\ln \frac{w_x}{w_1} - \frac{w_x - w_1}{w_{n+1}} \right) + c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в} \right) \text{ кг/м}^3. \qquad (14)$$

Приведенная выше закономерность распределения по крупности насыщающих поток взвешенных наносов позволила раз-

работать метод расчета ирригационных отстойников, сущность которого заключается в следующем.

Турбулентный поток обладает способностью взвешивать определенное количество наносов. Для расчетов можно допустить, что если поток полностью затрачивает эту способность на транспортирование взвешенных наносов критической мутности, то остальная часть наносов (избыточная мутность), не подвергаясь

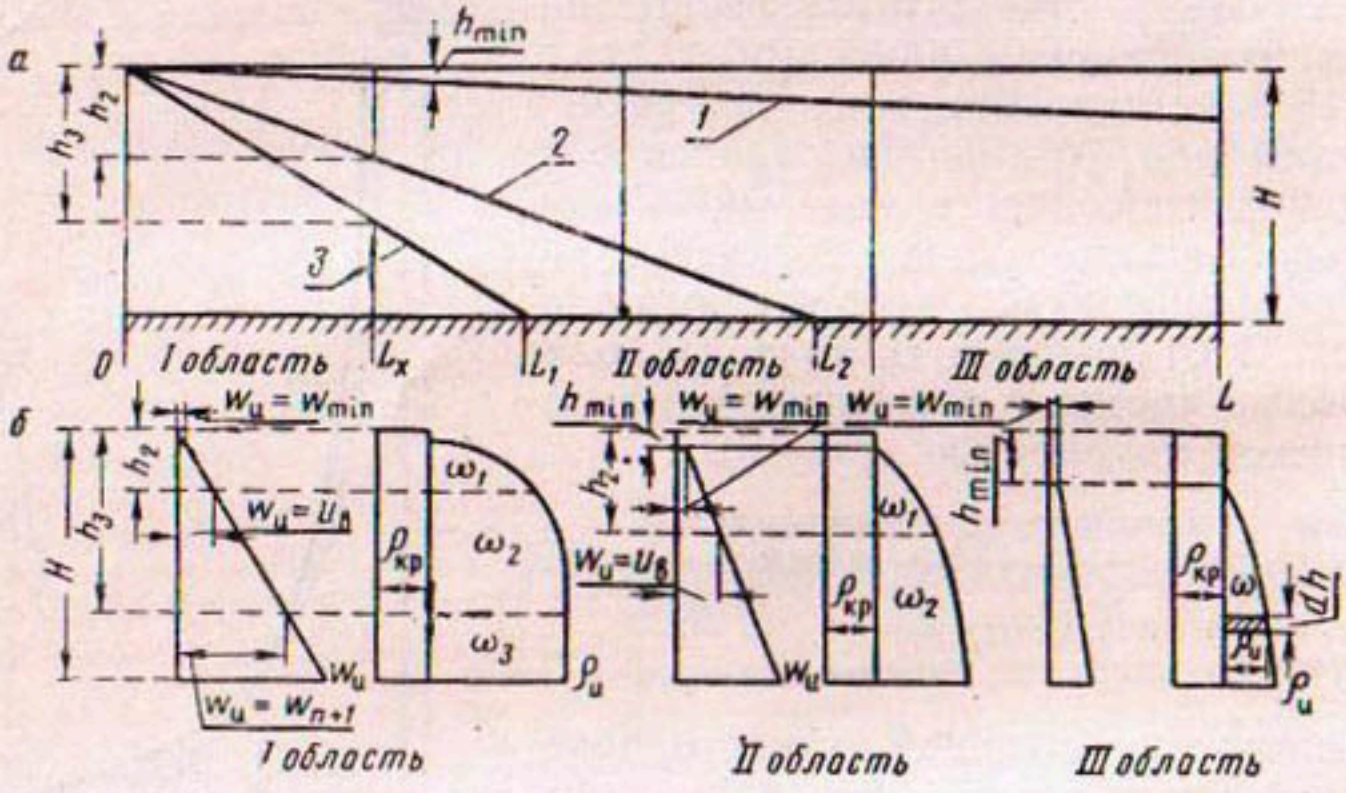


Рис. 4. Траектории падения частиц наносов в отстойниках и эпюры распределения по глубине $\rho_н$ и $W_н$:

а — траектории падения частиц наносов с w_{min} (*1*); $W = u_в$ (*2*); W_{n+1} (*3*); *б* — эпюры распределения по глубине $\rho_н$ и $W_н$.

действию взвешивания, будет выпадать со скоростью, равной гидравлической крупности частиц. Тогда расстояние L, на котором частица наименьшей крупности, находящаяся у поверхности, при равномерном движении потока осядет на дно, определится равенством:

$$L = \frac{v}{w_{min}} H = \frac{q}{w_{min}} м. \qquad (15)$$

Следовательно, на расстоянии L поток полностью освобождается от избыточного количества наносов. В любом другом створе, расположенном на расстоянии $L_x < L$, в потоке остается некоторое количество наносов избыточной мутности $\rho_{нх}$. Поэтому полную мутность на расстоянии L_x можно выразить в виде:

$$\rho_x = \rho_{кр} + \rho_{нх}. \qquad (16)$$

Пользуясь равенством (16), можно рассчитать динамику осаждения наносов, а также величину мутности при выходе из отстойника. Для упрощения расчетов допускается, что мутность

в начальном створе отстойника и скорость течения в нем распределены по глубине равномерно.

На рисунке 4 показаны траектории падающих из поверхностного слоя частиц наносов с гидравлической крупностью w_{min}, w_{n+1} и $w=v_в$. Как видно из рисунка, от избыточного количества наносов на расстоянии L_x полностью освобождается только верхний слой потока глубиной:

$$h_{min} = \frac{w_{min}}{v} L_x \text{ м}. \tag{17}$$

Ниже этого слоя в потоке сохраняется часть наносов избыточной мутности, количество которых у дна увеличивается. Наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов избыточной мутности $w_и$ на любой глубине h может быть выражена в виде:

$$w_и = \frac{vh}{L_x}. \tag{18}$$

Следовательно, на любой глубине потока количество оставшихся во взвешенном состоянии наносов избыточной мутности можно определить как для фракции с предельными гидравлическими крупностями w_{min} и $w_и$.

Среднее по глубине количество оставшихся во взвешенном состоянии наносов избыточной мутности $\rho_{их}$ будет:

$$\rho_{их} = \frac{\int_{h_{min}}^{H} \rho_{иh}\, dh}{H}, \tag{19}$$

где $\rho_{иh} = f(w_и) = f\left(\frac{v}{L_x} \cdot h\right)$.

Значение $w_и$ при $L_x > L_2 = \frac{q}{u_в}$ (рис. 4) по всей глубине потока остается меньше предельной скорости взвешивания $u_в$. При $L_1 < L_x < L_2$ величина $w_и$ на некоторой глубине становится равной $u_в$ и далее превышает последнюю.

При $w_и = u_в$ глубина потока:

$$h_2 = \frac{u_в}{v} L_2. \tag{20}$$

Из равенства (20) следует, что при $h_2 \geqslant H$ на всей глубине потока будет $w_и < u_в$ (область III, рис. 4).

На начальном участке отстойника в пределах $L_x < L_1 = \frac{q}{w_{n+1}}$ (I область) величина $w_и$ ниже глубины h_2 превышает $u_в$ и достигает наибольшей гидравлической крупности частиц начальной мутности на глубине:

$$h_3 = \frac{w_{n+1}}{v} L_1. \tag{21}$$

В нижнем слое потока на этом участке высотой $H-h_3$ сохраняется полностью начальная мутность.

При указанных изменениях значения $w_н$ меняется также выражение избыточной мутности $\rho_{нh}$. Вследствие этого интегрирование в уравнении (19) в пределах $h_{\min}$ и H справедливо только в пределах III области отстойника. В пределах II области интегрирование производится от $h_{\min}$ до h_2 и от h_2 до H, а для I области от $h_{\min}$ до h_2, от h_2 до h_3 и от h_3 до H.

В соответствии с изложенным, после интегрирования уравнение динамики осаждения наносов по длине отстойника имеет вид:

в пределах I области

$$\rho_{x_I} = \rho_0 - \frac{1}{2w_H}\left[\frac{c_0}{w_{n+1}}(w_{n+1} - w_{\min})^2 - \frac{c_т}{u_в}(u_в - w_{\min})^2\right] кг/м^3; \quad (22а)$$

в пределах II области

$$\rho_{x_{II}} = \rho_{0\,(w_1,\, w_H)} - \frac{1}{2w_H}\left[\frac{c_0}{w_{n+1}}(w_H - w_{\min})(2w_{n+1} - w_H - w_{\min}) - \frac{c_т}{u_в}(u_в - w_{\min})^2\right] кг/м^3 \quad (22б)$$

и в пределах III области

$$\rho_{x_{III}} = \rho_{0\,(w_1,\, w_H)} + \rho_{т\,(w_H,\, u_в)} - \frac{w_H - w_{\min}}{2w_H}\left[\frac{c_0}{w_{n+1}}(2w_{n+1} - w_H - w_{\min}) - \frac{c_т}{u_в}(2u_в - w_H - w_{\min})\right] кг/м^3, \quad (22в)$$

где

$$\rho_{0\,(w_1,\, w_H)} = c_0\left(\ln\frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}}\right) кг/м^3, \quad (23)$$

$$\rho_{т\,(w_H,\, u_в)} = c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_H} - \frac{u_в - w_H}{u_в}\right) кг/м^3 \quad (24)$$

$$\text{и } w_H = \frac{vH}{L} м/сек. \quad (25)$$

В уравнениях (22 а — в) $w_{\min} = w_x$ при $w_x > w_1$ и $w_{\min} = w_1$ при $w_x \leqslant w_1$.

Начальный участок отстойника при равномерном режиме потока усиленно заиляется, вследствие чего при эксплуатации глубина и скорость потока изменяются по длине отстойника.

Как видно из равенства (15), длина пути осаждения частиц наносов избыточной мутности, расположенной на любой глубине потока в начальном створе, при постоянном удельном расходе является постоянной величиной и не зависит от изменения глубины воды в отстойнике. В ирригационных отстойниках, которые обычно устраивают с постоянной шириной, изменение глубины не оказывает влияния на длину пути осаждения наносов. Из этого следует, что характер распределения по длине отстойника на-

носов избыточной мутности, которая образуется на начальном участке его, также не зависит от изменения глубины воды.

Однако с изменением глубины воды в отстойнике меняется транспортирующая способность потока, критическая и избыточная мутность. При увеличении глубины воды количество избыточных наносов по длине отстойника непрерывно растет.

Учет неравномерности движения потока в отстойнике представляет большие трудности. Для упрощения длину отстойника можно разделить на короткие участки и расчет вести последовательно по средним скоростям и глубинам, принимая в пределах участка равномерный режим потока.

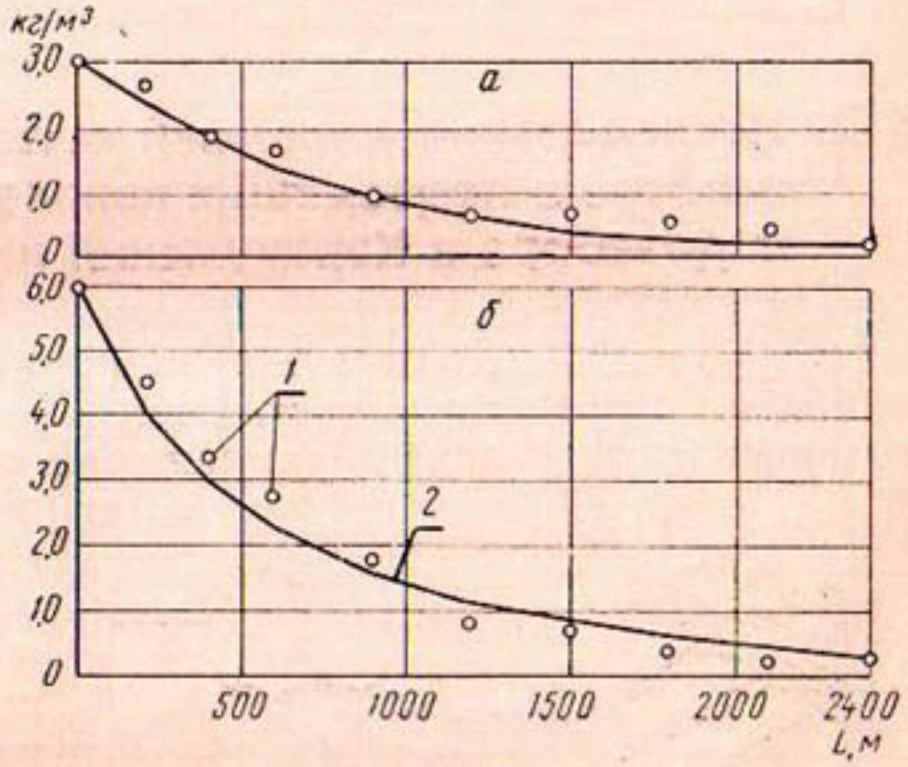


Рис. 5. Изменение мутности по длине в Куль-Арыкском отстойнике в 1941 г.:
а — 14 апреля; *б* — 12 мая. *1* — данные наблюдений; *2* — расчетные данные.

В этом случае по избыточной мутности первого участка сначала определяют количество оставшихся во взвешенном состоянии наносов в конце каждого участка. Начиная со второго участка образуется дополнительная избыточная мутность от разности критических мутностей на первых двух участках. Осаждение мутности рассчитывают по участкам, принимая во внимание, что наносы начинают осаждаться с начала второго участка, до которого они были распределены равномерно по глубине. Далее подсчитывают осаждение наносов на третьем участке и т. д. Величина мутности в конце любого участка отстойника составляет сумму оставшихся во взвешенном состоянии в этом створе наносов от избыточных мутностей, которые образовались на всех участках, лежащих выше расчетного створа и критической мутности данного участка.

Для сравнения на рисунке 5 приведены графики изменения режима наносов в Куль-Арыкском отстойнике. Как видно из этих данных, результаты расчета по описанному выше методу довольно близко совпадают с данными наблюдений.

Основные расчетные положения, вытекающие из закономерности распределения наносов по крупности, позволили составить также метод расчета промыва отстойников от наносов и метод

подбора наиболее выгодных размеров отстойников, при которых достигается высокая их производительность и максимально сокращается объем работ по строительству. Эти положения могут быть использованы и при решении других инженерных задач, связанных с движением наносов: расчет отстойников и деривационных каналов гидростанций, русловых процессов, заиления водохранилищ и водозабора из них, гидротранспорта и др.

§ 2. Исследования динамики осаждения наносов в подводящих каналах водозабора в Каракумский канал

В 1956 и 1957 гг. гидротехнической лабораторией ВНИИГиМ совместно с проектным институтом «Туркменгипроводхоз» проводились исследования динамики осаждения наносов в подводящих каналах водозабора Каракумского канала (рис. 6).

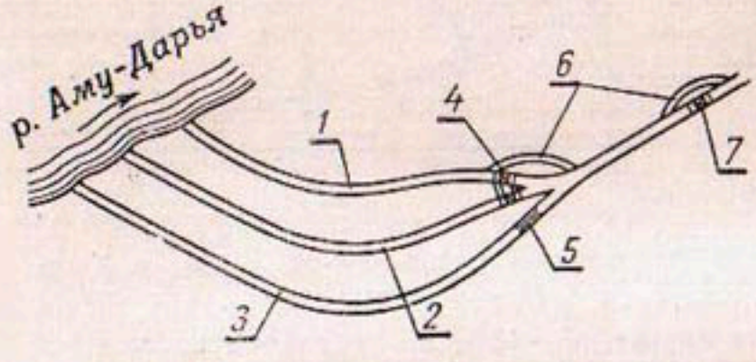


Рис. 6. Схема головного участка Каракумского канала (первая очередь):

1 — первый подводящий канал; *2* — второй подводящий канал; *3* — третий подводящий канал; *4* — новое головное сооружение; *5* — судоходный шлюз (построен в 1958 г.); *6* — обводные каналы; *7* — старое головное сооружение.

В период исследований (1956) по третьему подводящему каналу пропускались небольшие расходы (26—46 *м*³/*сек* против 130 *м*³/*сек*, предусмотренных проектом) и скорости течения в нем были также небольшими, поэтому он подвергался усиленному заилению (рис. 7). На первом подводящем канале в 1957 г. расходы, а следовательно и скорости потока, были больше, чем в 1956 г., поэтому наносы осаждались менее интенсивно. Протяженность третьего подводящего канала составляла 4000 *м*, а длина первого — 3170 *м*. Регулирование расходов, забираемых в канал, проводилось на старом головном сооружении, расположенном в 7 *км* от реки.

В периоды исследований в Каракумский канал вода поступала по третьему и первому подводящим каналам, затем по обводному каналу длиной 860 *м*, а затем по участку от нового до старого головных сооружений протяженностью 1900 *м* (отводящая часть). Проектная ширина подводящих каналов по дну равна 28 *м*, заложение откосов 1 : 2, уклон дна — 0,00010.

Ширина каналов и глубина воды в них были непостоянны в зависимости от заиления и очистки, которую проводили землесосами.

Во время исследований отбирали пробы мутности в реке и в подводящих каналах, промеряли глубину этих каналов через 100—200 *м*; измеряли расходы и уровни свободной поверхности воды в каналах, определяли фракционный состав и общую мутность в створах по отобранным пробам.

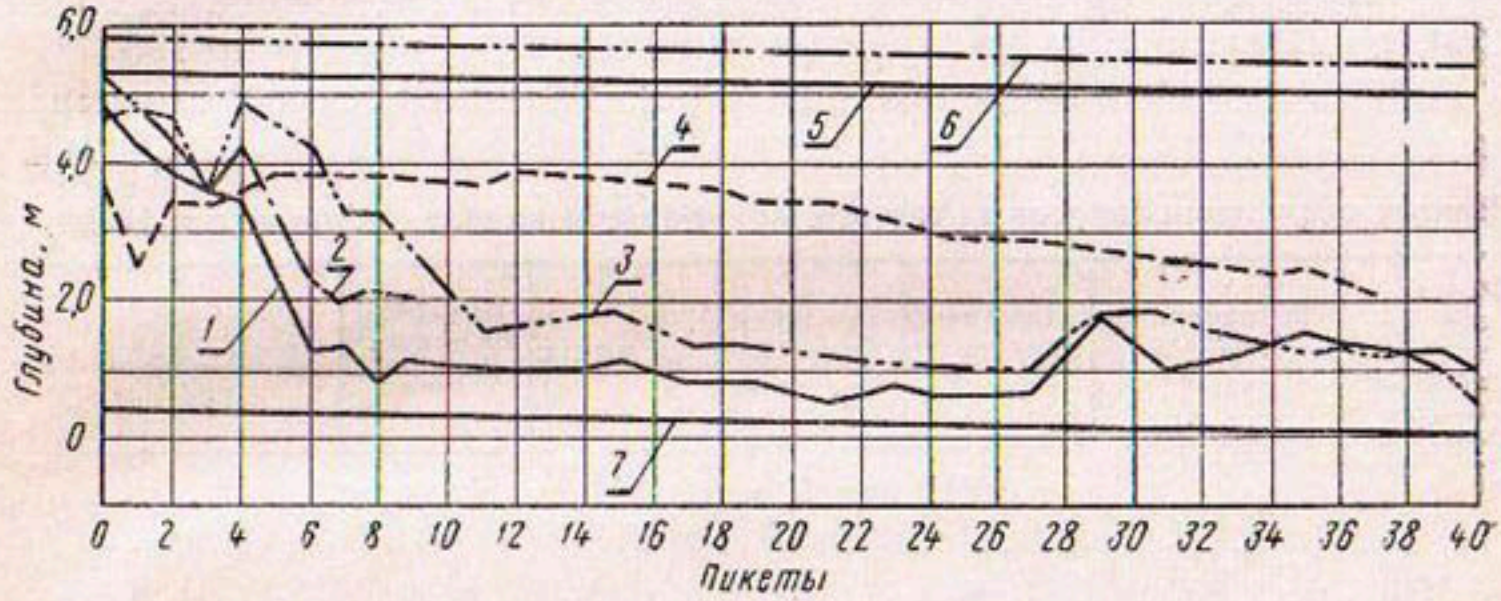


Рис. 7. Продольные профили второго подводящего канала:

1 — от 4/VII; *2* — от 13/VII; *3* — от 25/VII и *4* — от 16/VIII 1956 г.; *5* — уровень воды 4/VII 1956 г.; *6* — уровень воды 25/VII 1956 г.; *7* — проектное дно.

Отбор проб на мутность проводился интегральным способом. В каждом створе канала пробы брали на трех вертикалях, в реке — на четырех. Пробы, взятые в одном створе, при анализе объединялись.

Измеренную мутность сопоставили с расчетной, определенной по методу ВНИИГиМ [23]. Для определения расчетной мутности в каждом створе брали средние гидравлические элементы потока на вышележащих участках. Предельные гидравлические крупности взвешенных наносов (наибольшая w_{n+1} и наименьшая w_1), необходимые для расчетов, определяли по составу речной

ТАБЛИЦА 2

Мутность и состав поступающих в канал наносов

Дата наблюдений		Общая мутность ρ_0, *кг/м³*	Мутность по фракциям, *кг/м³*			Предельные крупности, *мм/сек*	
			$<0{,}01$	$0{,}01-0{,}05$	$d>0{,}05$	w_{n+1}	w_1
6/VII	1956 г.	3,112	0,261	2,162	0,689	13,8	0,065
27/VIII		5,198	0,226	4,019	0,953	10,0	0,075
16/V	1957 г.	3,377	2,023*	1,285	0,069	12,0	0,002
4/VI		6,310	3,030*	3,233	0,047	9,4	0,0176
14/VII		4,172	—	—	—	19,4	0,022
27/VIII		3,00	0,879	0,972	1,149	35,0	0,028

* $d<0{,}015$ *мм*.

мутности с учетом температуры воды. Методика определения значений w_{n+1} и w_1 приведена в § 4 настоящей работы.

Общая мутность и состав поступающих в подводящие каналы наносов, а также вычисленные значения предельных гидравлических крупностей их w_{n+1} и w_1 приведены в таблице 2.

В таблице 3 приведены результаты исследований осаждения взвешенных наносов на третьем подводящем канале в 1956 г. и сопоставление измеренных величин мутности с расчетными.

ТАБЛИЦА 3

Данные осаждения наносов на третьем подводящем канале-отстойнике в 1956 г.

Расстояние от входа в канал, м	Измеренная мутность $\rho_{изм}$, кг/м³	Средняя глубина $H_{ср}$, м	Средняя скорость $v_{ср}$, м/сек	$u_в$, мм/сек	Мутность по расчету $\rho_{расч}$, кг/м³	$\frac{\rho_{расч}-\rho_{изм}}{\rho_0}\cdot 100\%$
6/VII при $Q=30{,}2$ м³/сек						
0	3,112					
500	2,650	1,26	0,53	3,14	2,28	—11,9
1000	1,971	1,94	0,39	1,66	1,43	—17,3
1500	1,247	2,17	0,34	1,28	1,16	— 2,8
2000	0,864	2,37	0,31	1,05	0,90	+1,16
2500	0,384	2,54	0,28	0,88	0,65	+8,6
3000	0,331	2,58	0,27	0,79	0,58	+8,0
4000	0,243	2,66	0,26	0,77	0,39	+4,7
27/VII при $Q=34{,}75$ м³/сек						
0	5,198					
500	4,309	1,10	0,59	3,94	3,99	— 6,1
1000	3,683	1,53	0,48	2,58	2,49	—23,0
2000	2,533	1,98	0,39	1,84	1,65	—16,9
3000	0,980	2,22	0,35	1,31	1,06	+ 1,5
4000	0,498	2,30	0,33	1,21	0,89	+ 7,5

При практических расчетах наибольший интерес представляет степень осветления потока в отстойнике, поэтому автор приводит расхождение между фактическим $\frac{\rho_0-\rho_{изм}}{\rho_0}$ и расчетным $\frac{\rho_0-\rho_{расч}}{\rho_0}$ осветлением в процентах. Эти данные показывают в общем удовлетворительное совпадение фактического и расчетного осветления потока. Значительное отклонение (17—23%) фактических величин от расчетных наблюдается в начальной части подводящего канала, что является следствием работы землесосов по очистке канала на этом участке и возможного взмучивания мелких фракций.

Результаты исследований осаждения наносов на первом подводящем канале в 1957 г. при больших, чем в 1956 г., расходах приведены в таблице 4. В связи с наличием значительного объема заиления скорости в подводящем канале были более высокие, а осаждение наносов менее интенсивным.

ТАБЛИЦА 4

Данные осаждения наносов на первом подводящем канале-отстойнике в 1957 г.

Расстояние от входа в канал, м	Измеренная мутность $\rho_{изм}$, кг/м³	Средняя глубина $H_{ср}$, м	Средняя скорость $v_{ср}$, м/сек	$i \cdot 10^{-4}$	$u_в$, мм/сек	Мутность по расчету $\rho_{расч}$, кг/м³	$\frac{\rho_{расч}-\rho_{изм}}{\rho_0}\cdot 100\%$
			16/V при $Q=52{,}75$ м³/сек				
0	3,377						
1270	3,192	2,28	0,506	0,86	2,43	2,818	—11,1
1970	2,852	2,88	0,403	0,212	1,56	2,415	—12,9
2470	2,943	3,22	0,347	0,148	1,2	2,208	—21,7
3170	2,956	2,74	0,396	0,213	1,53	2,311	—19,1
			4/VI при $Q=46{,}44$ м³/сек				
0	6,31						
970	4,102	2,13	0,45	0,397	2,06	3,983	—1,9
1470	3,985	2,60	0,39	0,254	1,57	3,506	—7,6
2470	2,806	2,72	0,343	0,169	1,20	2,809	+0,05
3170	1,607	2,73	0,325	0,15	1,11	2,491	+14,0
5870	1,198	3,26	0,315	0,117	1,01	1,657	+7,3
			14/VIII при $Q=67{,}85$ м³/сек				
0	4,172						
370	2,900	2,56	0,567	0,693	3,06	3,173	+6,5
870	2,896	2,63	0,508	0,693	2,72	2,777	—2,7
1470	2,579	2,43	0,531	0,693	2,86	2,688	+2,6
2070	2,661	2,94	0,47	0,693	2,48	2,507	—3,7
3170	2,557	2,48	0,523	0,693	2,80	2,497	—1,4
			27/VIII при $Q=55{,}73$ м³/сек				
0	3,00						
470	2,109	2,18	0,502	0,84	2,80	1,991	— 3,9
970	1,897	2,90	0,394	0,84	2,14	1,710	— 6,2
1470	1,960	2,28	0,540	0,84	3,04	1,992	+ 1,1
1870	1,886	2,71	0,438	0,84	2,40	1,740	— 4,9
2470	1,956	2,84	0,412	0,84	2,25	1,598	—11,9
3170	2,084	2,22	0,538	0,84	3,04	1,992	— 3,1

Наибольшее отклонение расчетных и измеренных величин осветления (19—21%) наблюдалось 16/V 1957 г., что объясняется большим содержанием частиц $d<0{,}015$ мм в составе мутности речного потока при входе в канал (более 50%).

Приведенные данные показывают, что расчет по осаждению наносов при неравномерном режиме потока можно без особых погрешностей вести по формулам для равномерного режима,

применяя осредненные величины гидравлических элементов потока на вышележащих участках расчетных створов.

Сопоставление мутности, измеренной на расстоянии 30 *км* от входа в канал, с транспортирующей способностью потока, определенной по методу ВНИИГиМ [23], показало, что, когда в нижний бьеф поступает значительное количество наносов, расчетная мутность $\rho_т$ и измеренная $\rho_{изм}$ близки между собой (табл. 5).

В тех случаях, когда в подводящем канале поток подвергался очень большому осветлению, расчетная мутность на 30 *км* канала значительно превышала измеренную. Несмотря на значительную протяженность участка канала, поток не мог дополнить свое насыщение за счет мелких частиц, которых, очевидно, было недостаточно в составе грунтов дна. В 1957 г. при тех же примерно расходах и скоростях, но значительно меньшем осветлении потока измеренная мутность в створе 30 *км* была в несколько раз больше (табл. 5), чем в 1956 г.

Расчетную мутность определяли по формуле (9) транспортирующей способности потока.

На основании приведенных материалов можно сделать выводы:

1. В 1956 и 1957 гг. в подводящих каналах Каракумского канала наблюдалось интенсивное осаждение взвешенных наносов.
2. Сопоставление фактической динамики осаждения наносов в подводящих каналах с расчетной по методу А. Г. Хачатряна, изложенному в § 1, дало удовлетворительные результаты.

ТАБЛИЦА 5

Изменение мутности потока на Каракумском канале (участок длиной 30 *км*)

Дата наблюдений	Среднее значение			Расход воды Q, $м^3/сек$	Мутность потока, $кг/м^3$			
	$v_{ср}$, $м/сек$	$u_в$, $мм/сек$	w_1, $мм/сек$		в реке ρ_0	ниже головного сооружения	на расстоянии 30 *км*	расчетная $\rho_т$
1956 г.			При $i_{ср}=0{,}6\times10^{-4}$					
15—16/VI	0,402	1,97	0,062	39,4	2,269	0,935	0,648	0,982
27—28/VI	0,36	1,76	0,062	35,3	2,286	0,202	0,156	0,838
17—18/VII	0,30	1,47	0,062	29,3	5,366	0,210	0,198	0,605
1957 г.			При $i_{ср}=0{,}6\times10^{-4}$					
25—26/IV	0,32	1,53	0,068	31,23	3,374	1,058	0,855	0,664
27—28/IV	0,32	1,53	0,068	30,99	2,688	1,187	1,120	0,664
14—15/V	0,57	2,94	0,024	35,5	4,019	3,272	2,633	2,250
21—22/V	0,41	2,08	0,024	39.8	1,971	1,772	1,408	1,448
26—27/VI	0,50	2,52	0,077	49,35	3,212	2,004	1,687	1,275
10—11/VII	0,52	2,68	0,058	50,91	3,203	1,833	1,287	1,530

3. Для условий заиляемых каналов, в которых движение потока в общем случае является неравномерным, расчет без особой погрешности можно вести по формулам равномерного движения с применением осредненных величин гидравлических элементов потока на вышележащих участках расчетных створов. Такое допущение значительно сокращает расчет каналов-отстойников.

При большом осветлении потока в подводящих каналах мутность 0,2 *кг/м*^{3} оставалась почти без изменения до 30 *км* канала, несмотря на то, что расчетная транспортирующая способность была значительно выше. Причина этого — отсутствие в материалах дна канала мелких частиц, которые могли насытить поток.

§ 3. Результаты натурных исследований по осаждению наносов в отстойнике Баграм-Тапинского гидроузла

Как отмечалось выше, на основании анализа многочисленных исследований оросительных систем р. Аму-Дарьи в 1953—1955 гг. был разработан метод расчета транспортирующей способности потока и осаждения наносов в отстойниках. Этот метод, основанный на наличии закономерности в распределении по крупности насыщающих поток наносов, по сравнению с другими, основанными на применении средней гидравлической крупности транспортируемых наносов, имеет более широкую область применения и позволяет выполнять расчеты с близкими к натуре результатами.

После его опубликования [23] проведены исследования по осаждению наносов в отстойниках оросительных систем, берущих воду из других рек. Материалы этих исследований, частично опубликованные в работах Х. Ш. Шапиро [29] и в § 2 настоящей работы, показали удовлетворительное совпадение натурных данных с расчетными.

Ниже приведены результаты исследований осаждения наносов в Баграм-Тапинском отстойнике, которые были выполнены аспирантом ВНИИГиМ Нацвлишвили А. Г. совместно с работниками Азербайджанского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации (АзНИИГиМ). Данные заимствованы из диссертационной работы А. Г. Нацвлишвили.

Многокамерный отстойник с гидравлической очисткой Баграм-Тапинского гидроузла[1] расположен на правом берегу

---

[1] Проект гидроузла составлен в проектном институте «Средазгипроводхлопок» под руководством действительного члена Академии наук Узбекской ССР В. В. Пославского.

р. Аракса непосредственно за водоприемником. Он предназначен для частичного осветления воды и питания Главного Муганского, Азизбековского и Расул-Архского оросительных каналов. Отстойник с периодическим промывом состоит из девяти камер (рис. 8), из которых одна промывается, а остальные восемь работают на осветление потока.

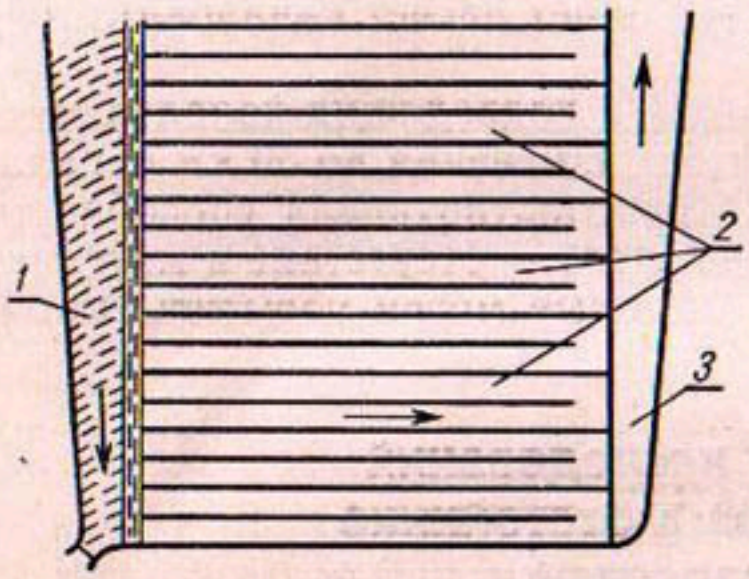


Рис. 8. Схематический план многокамерного отстойника Баграм-Тапинского гидроузла:

1 — аванкамера; *2* — камеры отстойника; *3* — бассейн для осветления воды.

Вода в камеры отстойника поступает из аванкамеры. Угол между направлением камер отстойника и аванкамерой составляет 90°. Каждая камера по условиям промыва разделена на две секции продольной стенкой, которая заканчивается в 6 *м* от концевого водослива. Через последний осветленная вода поступает в водосборный бассейн, распределяющий воду между каналами. Общая длина камер составляет 125 *м*, ширина каждой секции 6 *м*, дно камер с обратным уклоном $i=0{,}005$. Аванкамера имеет длину 115,2 *м*, ширина в начале 24,4 *м*, а в конце 10,9 *м*. Промывают камеры по секциям, выпуская промывной расход из-под щита. После промыва одной секции вторую промывают обратным движением воды.

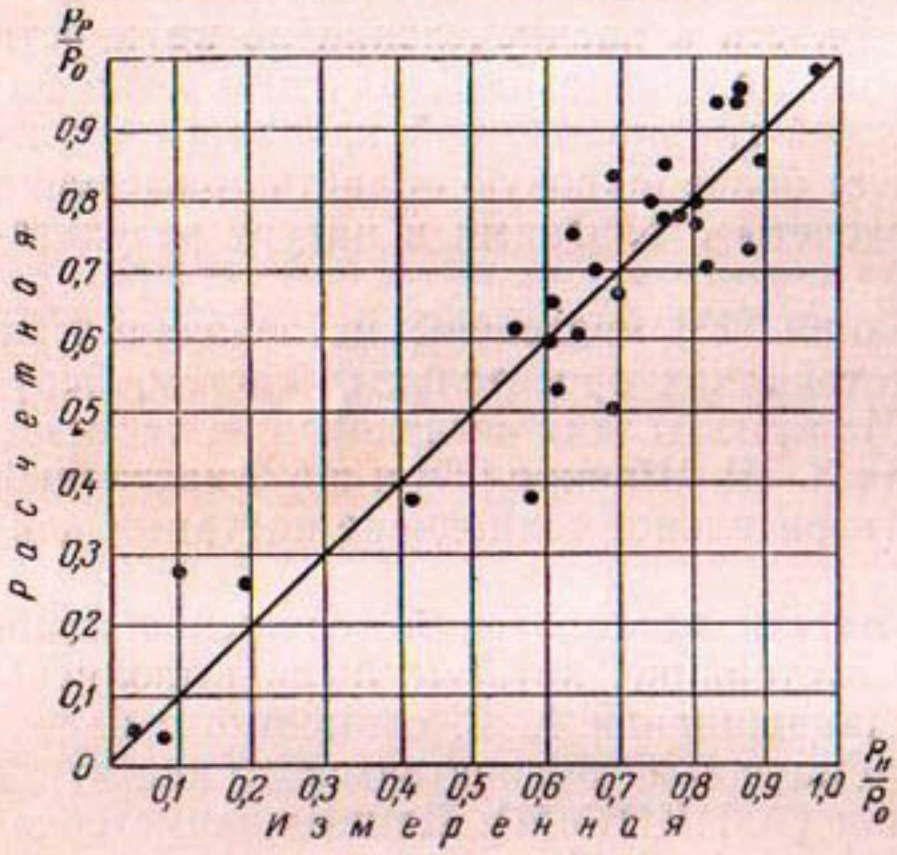


Рис. 8а. График сравнения степени осветления потока в отстойнике.

За период апрель — май 1961 г. провели 16 наблюдений осаждения наносов в отстойнике, при этом измеряли количество и состав наносов в начале и в конце отстойника, степень осветления потока, скорость движения и глубину воды, количество и объемный вес осевших в отстойнике наносов, тем-

пературу воды и т. п. Основные данные этих исследований приведены в таблице 6.

Значения предельных гидравлических крупностей речной мутности определяли по методу, изложенному в § 4.

Как показали исследования, мутность воды при входе в камеры отстойника была меньше, чем в реке, что свидетельствует о некотором осветлении потока в аванкамере за счет осаждения преимущественно крупных частиц (крупнее 0,1 *мм*). Мелкие же наносы, поступающие из реки, проходили через аванкамеру, не осаждаясь в отстойнике. Для учета этого расчетное значение наименьшей гидравлической крупности наносов в начале отстойника w_1 принимали равным наименьшей крупности частиц речной мутности, а значение наибольшей крупности w_{n+1} определяли по составу наносов в начале отстойника (табл. 6).

Наибольшие гидравлические крупности избытка наносов w_{II} вычисляли по формуле (25), которую при длине отстойника $L=125$ *м* можно записать в виде $w_{II}=8v\ H=8q$ *мм/сек*.

Расчет осаждения наносов в отстойнике и мутности на выходе из него вели по одной из формул (22, а—в), в зависимости от расчетной области. Как видно из этих данных, вычисленная мутность на выходе из отстойника довольно близко совпадает с измеренной в натуре. Отклонение по отдельным наблюдениям колеблется в пределах минус 12,7% — плюс 22,4% и в среднем составляет всего лишь 2,3%.

На рисунке 8а приведены сравнительные данные по осаждению наносов в отстойниках на каналах Кипчак-Бозсу (1939 г.), Куль-Арык (1941 г.) [23], на головном участке Каракумского канала (§ 2), на крупномасштабной модели отстойника Каракумского канала (1957—1958 гг.) [29], что также подтверждает удовлетворительное совпадение их с расчетными.

Ниже приведены результаты наблюдений за осаждением наносов в отстойнике на канале Хошчобанлы (Сальянский район Азербайджанской ССР), берущем воду для орошения из р. Куры.

Отстойник непрерывного действия находится в эксплуатации с 1956 г. [19] и очищается посредством передвижной сифонной установки конструкции Ф. С. Салахова [20]. Отстойник расположен на расстоянии 150 *м* от водосборного колодца нагнетательных трубопроводов плавучей насосной станции и выполнен в земляном русле с трапецеидальным поперечным сечением (рис. 9). Ширина зеркала воды в отстойнике $B=8{,}0$ *м*, ширина по дну $b=1{,}0$ *м*; глубина воды в нем $H=2{,}8$ *м*; рабочая длина 300 *м*. Отстойник рассчитан на расход 1,5 $м^3/сек$ при средней скорости течения $v=0{,}1$ *м/сек*, но фактически расходы не превышают 1,2 $м^3/сек$ (от 0,35 до 1,20 $м^3/сек$).

В период исследований осаждение наносов в отстойнике происходило при скорости $v=0{,}063$ *м/сек*. Мутность потока в начале отстойника составляла $\rho_0=4{,}5$ $кг/м^3$ и на выходе из отстойника

ТАБЛИЦА 6

Данные гидравлических элементов, мутности и степени осветления потока в отстойнике Баграм-Тапинского гидроузла

Дата наблюдений	Скорость течения воды v, *м/сек*	Глубина воды H, *м*	Предельные гидравлические крупности частиц наносов		Взвешивающая скорость потока $u_в$, *мм/сек*	Наибольшая гидравлическая крупность частиц избытка наносов в конце отстойника $w_н$, *мм/сек*	Начальная мутность ρ_0, *кг/м³*	Мутность на выходе из отстойника, *кг/м³*		Отклонение $\frac{\rho_{в\ расч} - \rho_{в\ изм}}{\rho_{в\ изм}} \cdot 100\%$
			наименьшая w_1, *мм/сек*	наибольшая w_{n+1}, *мм/сек*				измеренная $\rho_{в\ изм}$, *кг/м³*	по расчету $\rho_{в\ расч}$, *кг/м³*	
13 апреля	0,192	2,42	0,00049	2,76	0,486	3,72	0,554	0,539	0,535	— 0,7
14 »	0,168	2,77	0,009	3,50	0,373	3,73	1,352	1,166	1,238	+ 6,0
15 »	0,166	2,55	0,049	3,01	0,372	3,39	5,450	4,820	4,71	— 2,2
17 »	0,140	2,31	0,0343	4,90	0,268	2,59	2,934	2,251	2,27	+ 0,5
19 »	0,180	1,945	0,009	8,50	0,454	2,81	2,046	1,610	1,61	0
21 »	0,160	1,885	0,0113	5,57	0,365	2,41	1,686	1,342	1,35	+ 0,5
23 »	0,195	1,75	0,0155	12,8	0,537	2,73	2,204	1,810	1,58	—12,7
25 »	0,170	1,695	0,018	5,6	0,420	2,30	2,817	2,245	2.18	— 2,9
30 »	0,140	2,25	0,028	8,45	0,269	2,52	4,134	2,758	2,96	+ 7,0
3 мая	0,194	1,87	0,0159	15,00	0,526	2,90	2,694	1,831	1,90	+ 3,5
6 »	0,151	1,86	0,0107	6,40	0,326	2,25	2,084	1,522	1,68	+10,5
8 »	0,125	2,07	0,0278	10,10	0,216	2,07	3,135	1,932	2,068	+ 7,0
12 »	0,210	1,80	0,0103	10,30	0,612	3,02	2,950	2,297	2,28	+ 2,0
19 »	0,170	1,96	0,0170	8,10	0,405	2,67	1,700	1,071	1,28	+19,5
21 »	0,130	1,88	0,0045	4,20	0,238	1,95	0,893	0,610	0,744	+22,4
24 »	0,110	1,94	0,000516	23,0	0,164	1,705	0,608	0,500	0,572	+14,0

$\rho_в = 2{,}6 \div 2{,}64$ *кг/м³*, т. е. в среднем 2,62 *кг/м³*. В соответствии с этим осветление потока в отстойнике равнялось [(4,5—2,62) : 4,5]· · 100 = 41,8%. Фракционный состав взвешенных наносов по данным механического анализа приведен в таблице 7.

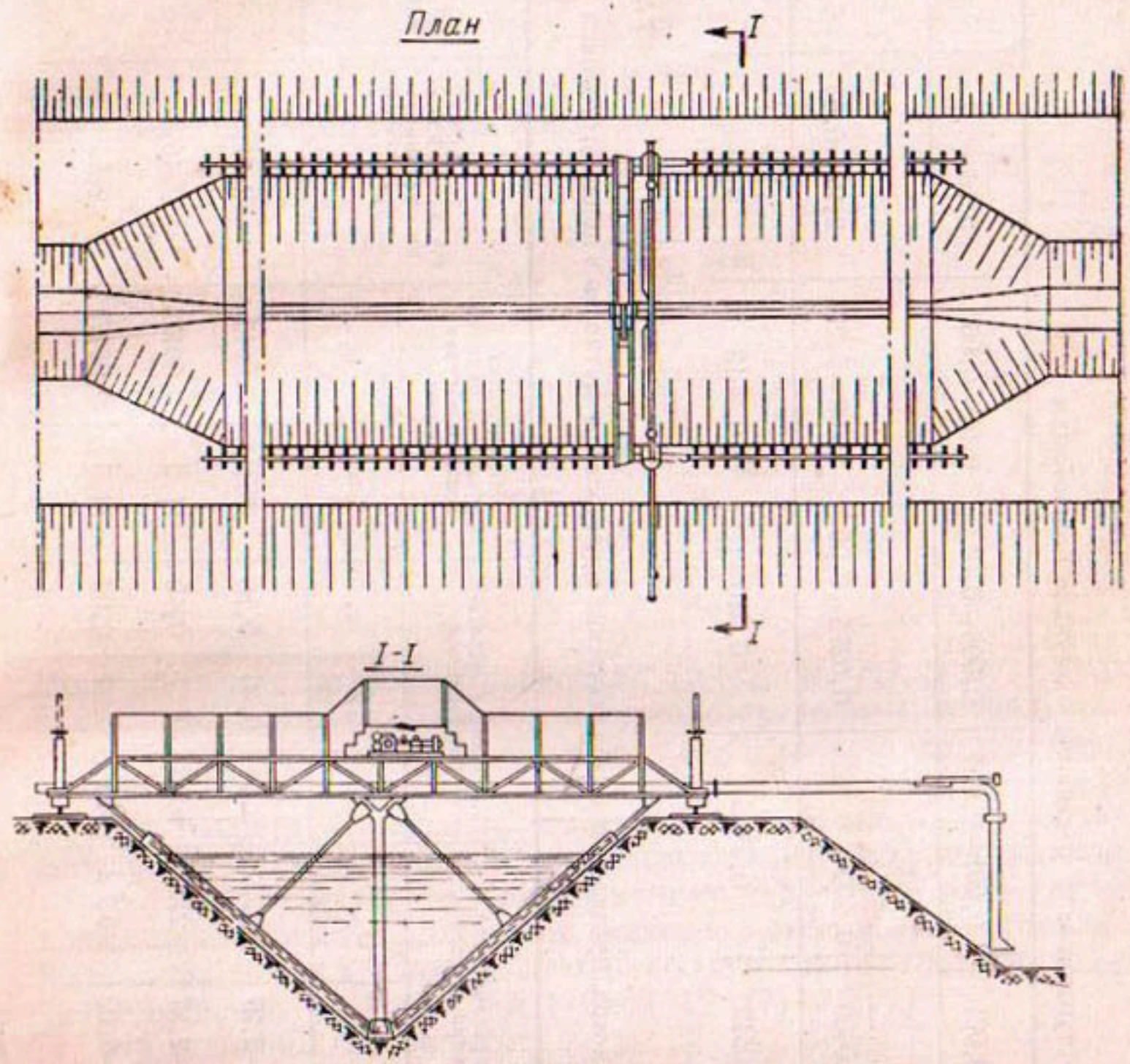


Рис. 9. Отстойник с сифонной очисткой (конструкция Ф. С. Салахова).

Для определения предельных значений гидравлической крупности частиц начальной мутности наносы были разделены на три фракции. А чтобы выяснить, как влияет порядок группирования на результат осаждения наносов в отстойнике, расчеты производили для трех вариантов (табл. 8).

В таблице 8 (1-я строка) в соответствии с рекомендациями А. Г. Хачатряна [23] деление наносов на фракции проведено по диаметру частиц менее 0,01 *мм*; от 0,01 до 0,05 *мм* и более 0,05 *мм*. По этим данным определены значения предельных круп-

ТАБЛИЦА 7

Фракционный состав наносов, поступающих в отстойник на канале Хошчобанлы

Диаметр частиц фракции, *мм*	<0,001	0,001—0,005	0,005—0,01	0,01—0,05	0,05—0,1	>0,1
Гидравлическая крупность частиц фракции, *мм*	w_1—0,0009	0,0009—0,0225	0,0225—0,09	0,09—2,27	2,27—6,63	6,63—w_{n+1}
Удельное содержание фракции	0,0512	0,2816	0,210	0,3612	0,070	0,026

ТАБЛИЦА 8

Удельные содержания фракций наносов, предельные гидравлические крупности и мутность в конце отстойника на канале Хошчобанлы

Варианты	Предельные гидравлические крупности фракции, *мм/сек*			Удельное содержание фракции			Предельные крупности наносов полного состава, *мм/сек*		Мутность в конце отстойника $\rho_в$, *кг/м³*	Осветление потока в отстойнике, %
	p_1	p_2	p_3	p_1	p_2	p_3	w_{n+1}	w_1		
1	<0,09	0,09—2,27	>2,27	0,54	0,36	0,10	9,0	0,0012	2,61	42,0
2	<0,0225	0,0225—2,27	>2,27	0,33	0,57	0,10	11,2	0,00174	2,46	45,3
3	<0,0009	0,0009—6,63	>6,63	0,05	0,92	0,03	14,5	0,00071	2,53	43,8

ностей частиц из уравнения 8, которое для первого варианта при $\rho_1 = 0{,}54$ имеет вид:

$$0{,}54 = \frac{\ln \frac{0{,}09}{w_1} - \frac{0{,}09 - w_1}{w_{n+1}}}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}}; \qquad (а)$$

для второй фракции при $\rho_2 = 0{,}36$:

$$0{,}36 = \frac{\ln \frac{2{,}27}{0{,}09} - \frac{2{,}27 - 0{,}09}{w_{n+1}}}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}} \qquad (б)$$

и для третьей фракции с удельным содержанием $\rho_3 = 0{,}10$:

$$0{,}10 = \frac{\ln \frac{w_{n+1}}{2{,}27} - \frac{w_{n+1} - 2{,}27}{w_{n+1}}}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}}. \qquad (в)$$

После решения подбором уравнений (*а*—*в*) получены $w_{n+1} = 9{,}0$ и $w_1 = 0{,}0012$ *мм/сек*. Тем же методом определены предельные гидравлические крупности наносов w_{n+1} и w_1 для других двух вариантов группировок фракций наносов (табл. 8).

Для расчета осаждения наносов в отстойнике нужно определить значения взвешивающей скорости $u_в$, постоянной кривой распределения мутности транспортирующей способности $c_т$ и начальной мутности c_0, а также значение наибольшей гидравлической крупности частиц избытка наносов в конце отстойника $w_н$ соответственно по формулам (10), (11), (7) и (25).

Эти величины составляют:

$$u_в = \frac{0{,}00975 \cdot 0{,}013 \cdot 0{,}063^{1/3}}{1{,}09} = 0{,}03 \text{ мм/сек};$$

$$c_т = 200\, u_в = 0{,}006 \text{ кг/м}^3;$$

$$c_0 = \frac{\rho_0}{\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}}} = \frac{4{,}5}{\ln \frac{9{,}0}{0{,}0012} - 1} = 0{,}57 \text{ кг/м}^3;$$

$$w_н = \frac{vH_{ср}}{l} = \frac{0{,}063 \frac{\omega}{B_{ср}}}{300} = \frac{0{,}063 \cdot 1{,}58}{300} = 0{,}33 \text{ мм/сек}.$$

Наименьшая гидравлическая крупность избытка наносов по формуле (12) равна:

$$w_x = \frac{C_т - C_0}{\frac{C_т}{u_в} - \frac{C_0}{w_{n+1}}} = \frac{0{,}006 - 0{,}57}{\frac{0{,}006}{0{,}00003} - \frac{0{,}57}{0{,}009}} = -0{,}004 < w_1.$$

Следовательно, значение w_{min} считаем равным значению w_1.

Полученные данные показывают, что $w_H = 0{,}33 > u_в = 0{,}03$. При таких w_H и $u_в$ осаждение наносов в отстойнике происходит в условиях второй расчетной области. В соответствии с этим величина мутности на выходе из отстойника определяется по формуле (22*б*).

Величина $\rho_{0(w_1, w_H)}$, входящая в эту формулу, равна:

$$\rho_{0(w_1, w_H)} = 0{,}57\left(\ln\frac{0{,}33}{0{,}0012} - \frac{0{,}33 - 0{,}0012}{9{,}0}\right) = 3{,}17\ кг/м^3.$$

Подставляя эти значения в (22б), получим:

$$\rho_в = 3{,}17 - \frac{1}{2 \cdot 0{,}33}\left[\frac{0{,}57}{9{,}0}(0{,}33 - 0{,}001)(2 \cdot 9 - 0{,}33 - 0{,}001) - \right.$$

$$\left. - \frac{0{,}006}{0{,}03}(0{,}03 - 0{,}001)^2\right] = 2{,}61\ кг/м^3.$$

Результаты расчета мутности, которые приведены в таблице 8, показывают, что расчет осаждения наносов по нашему методу дает близкое совпадение с данными наблюдений. Расчетное осветление потока составляет 42,0% против 41,8% по данным наблюдений.

Аналогичные работы были сделаны для остальных двух вариантов (2-я и 3-я строки таблицы 8). Как видно из этих данных, несмотря на существенное отличие в делении наносов на три фракции, значение мутности на выходе из отстойника по расчету почти не изменяется, а степень осветления потока по сравнению с первым вариантом отличается всего лишь на 1,8—3,3%.

§ 4. Рекомендации по расчету ирригационных отстойников

В основу предлагаемых рекомендаций по расчету ирригационных отстойников и транспортирующей способности потока положена выявленная закономерность в распределении по крупности насыщающих поток взвешенных наносов [23], которая наблюдается на большинстве равнинных и предгорных рек. Возможные отклонения в распределении наносов на отдельных реках от принятой закономерности мало отражается на результатах расчета. В этом случае результаты более близки к действительности, чем

при расчете с применением величины средней гидравлической крупности.

При водозаборе из горных рек, когда в составе взвешенных наносов мелких фракций содержится небольшое количество, не превышающее транспортирующую способность оросительной сети, отстойники предназначены для осаждения крупных частиц, и их можно рассчитывать способом, применяемым для отстойников гидростанций [22]. В этом случае в отстойнике осаждаются все частицы крупнее определенного диаметра, которые не могут транспортироваться каналами оросительной системы.

Назначение ирригационных отстойников сводится к осаждению части наносов, попадающих из реки в оросительные каналы, с последующим удалением отложений механическим или гидравлическим способами.

Основные требования, предъявляемые к ирригационным отстойникам:

1) обеспечить осаждение наносов, которые не могут быть транспортированы на орошаемые земли или в каналы оросительной сети, заиление которых нельзя допускать;

2) не допустить осаждения мелких полезных наносов, которые могут быть транспортированы на орошаемые земли;

3) использовать при благоприятных условиях энергию водного потока для гидравлической очистки осевших наносов;

4) создать условия для высокопроизводительной работы машин на очистке осевших наносов, а также удобного размещения удаляемых из отстойника наносов.

Основные схемы компоновки отстойников. Степень возможного регулирования мутности в отстойнике зависит от ряда факторов: от места расположения отстойника, от оснащенности его сооружениями, изменения гидравлического режима в нем, от способа очистки и др.

Тип отстойника выбирают на основе технико-экономического сравнения различных вариантов с учетом указанных факторов и местных условий.

Основные схемы компоновки отстойников представлены на рисунке 10.

I. Однокамерный отстойник (простейшего типа) с сооружением в конце его устраивают при бесплотинном водозаборе (рис. 10, I, *а*) и неустойчивом русле реки. Наносы из отстойника удаляют преимущественно механизмами. Режим мутности в отстойнике зависит от колебаний расходов и уровней воды в реке: чем выше уровень воды в реке, тем больше осветляется поток. В отдельных случаях, устроив сбросной канал в конце отстойника, можно удалить гидравлическим способом некоторую часть наносов. При плотинном водозаборе (рис. 10, I, *б*) наносы из кармана-отстойника удаляют обычно гидравлическим способом при помощи промывных устройств.

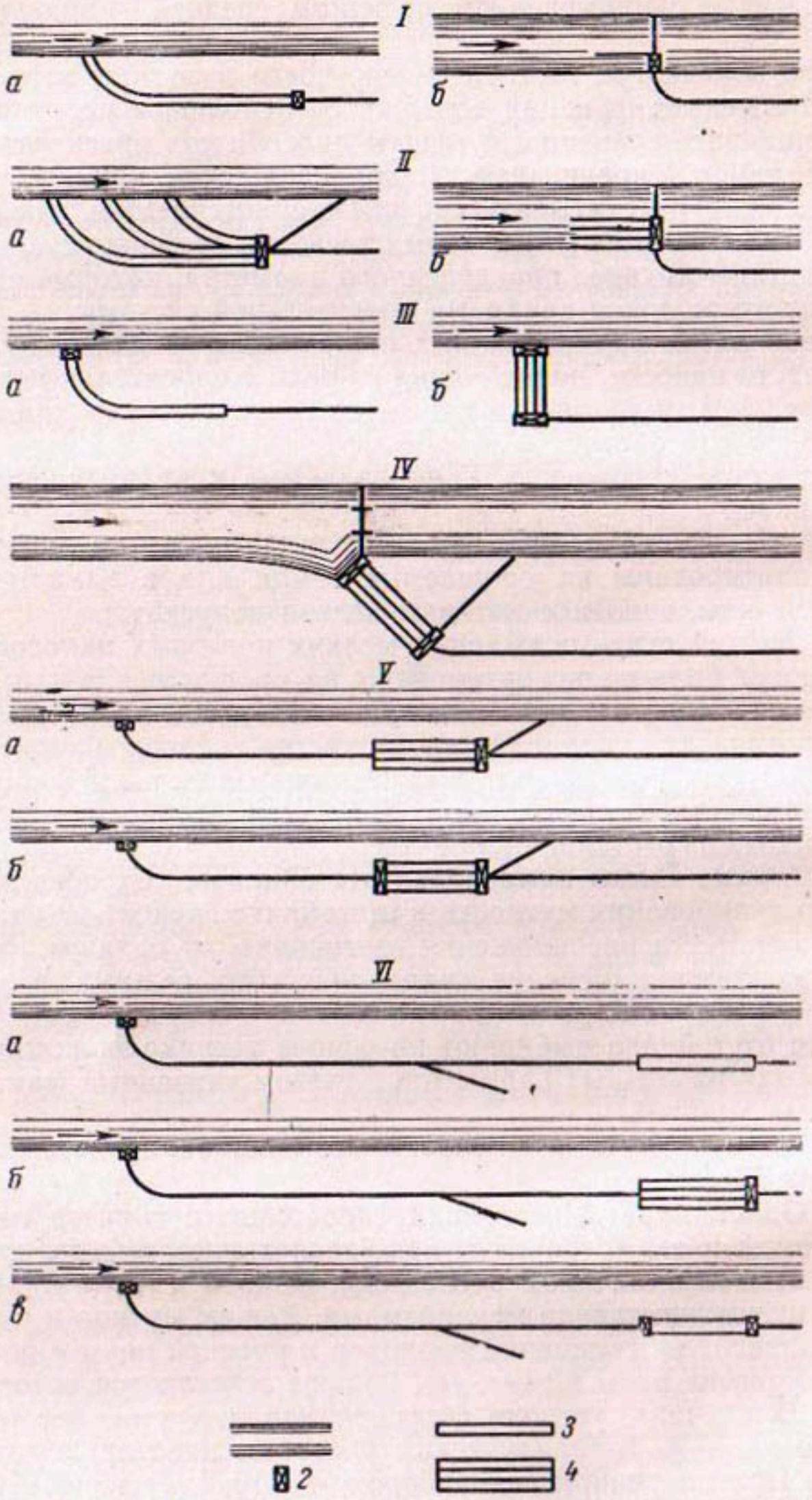


Рис. 10. Схемы расположения отстойников:

1 — река; *2* — регулирующее сооружение; *3* — отстойник однокамерный; *4* — отстойник многокамерный.

II. Многокамерный отстойник с сооружением на конце или несколько подводящих каналов головных частей с регулирующими сооружениями (рис. 10, II, *а*) устраивают при бесплотинном водозаборе.

Многокамерный отстойник позволяет лучше регулировать мутность путем включения в работу соответствующего числа камер или подводящих каналов в зависимости от режима мутностей и уровней воды в реке. При наличии достаточного перепада часть наносов можно удалить из отстойника гидравлическим смывом без прекращения подачи воды в систему. При плотинном водозаборе (рис. 10, II, *б*) и достаточном перепаде уровней воды отложения наносов из отстойника удаляют промывом.

III. При устойчивом русле реки и бесплотинном водозаборе можно строить однокамерный отстойник с сооружением у входа и механической очисткой наносов (рис. 10, III, *а*). В отличие от отстойников типа I, *а* и II, *а* степень регулирования мутности не зависит от уровней воды в реке, а определяется главным образом расходом воды в канале и начальной мутностью потока.

Многокамерный отстойник с сооружениями при входе и выходе, с механической очисткой наносов (рис. 10, III, *б*) обеспечивает необходимое регулирование мутности путем включения соответствующего числа камер и регулированием уровня воды в них с помощью сооружений.

IV. Схема аналогична отстойнику типа III, *б*, но с промывным устройством для гидравлической очистки наносов. Применяется при плотинном водозаборе и в отдельных случаях при бесплотинном водозаборе (при достаточном перепаде уровней).

V. Многокамерный промываемый отстойник располагают на значительном расстоянии от реки. Для промыва наносов используют перепад, образующийся за счет меньшего уклона в магистральном канале (по сравнению с уклоном реки). В головной части канала могут осаждаться крупные наносы, которые удаляют механизмами.

Отстойник устраивают с сооружением в конце его (рис. 10, V, *а*) или с двумя сооружениями в начале и конце (б). В последнем случае улучшаются условия регулирования мутности и уменьшаются промывные расходы за счет возможности резкого снижения уровней воды в отстойнике при промыве.

VI. Внутрисистемные отстойники с механической очисткой наносов предназначены для последующих осветлений потока. Могут быть однокамерные без сооружения, простейшего типа (рис. 10, VI, а), многокамерные с сооружением в конце (б) и однокамерные с сооружениями в начале и в конце (в).

В отдельных случаях, если есть поблизости понижения местности достаточной емкости, внутрисистемные отстойники можно устраивать с промывом аналогично схеме V.

Исходные данные для составления проекта отстойника. Для выбора типа отстойников и определения его основных размеров необходимо иметь данные, характеризующие режимы потока и наносов в реке, состав, физические и химические свойства речных наносов, режимы потока в канале и отстойнике, транспортирующую способность каналов оросительной системы, наличие достаточного расхода и напора воды для осуществления промыва отстойника от наносов и др. Состав этих данных зависит от месторасположения и способа очистки отстойника.

В частности, для расчета отстойника, расположенного на головном участке, с применением комбинированного способа очистки (гидравлическая и механическая), требуются следующие основные данные:

колебание горизонтов и расходов воды в реке и их обеспеченность;

уклон свободной поверхности в реке на участке от входа в канал до предполагаемого места сброса промывного расхода в реку;

содержание мутности воды в реке;

фракционный состав взвешенных наносов, их физические и химические свойства;

колебание температуры воды в реке;

количество донных наносов в реке, их состав; намечаемые мероприятия по борьбе с поступлением этих наносов в канал и ожидаемый эффект от их применения;

топография местности в районе расположения отстойника, сбросного канала и отвалов наносов механической очисткой; характеристика грунтов;

колебание расходов воды в канале (график водоподачи) и глубин воды на участке выше и ниже отстойника;

транспортирующая способность каналов оросительной системы и их коэффициент полезного действия;

наличие внутрисистемных отстойников и место их расположения;

типы машин по очистке, их производительность и основные характеристики.

Для других типов отстойников и условий их работы соответственно изменится и состав необходимых материалов. Например, для отстойника, расположенного на том же головном участке, но с выполнением очистки только машинами, нет необходимости иметь данные об уклоне свободной поверхности в реке. Для отстойников, расположенных вдали от входа в канал, или для внутрисистемных отстойников дополнительно потребуется определение изменения мутности и фракционного состава наносов на участке канала до подхода к отстойнику (гидравлические режимы в каналах от реки до отстойника), вместе с тем отпадает необхо-

димость в материалах по колебанию уровня воды, расходов и уклона свободной поверхности в реке.

Состав расчета отстойника. Задачей расчета отстойника является определение его размеров, объема заиления, мощности, расстановки и графика работы парка механизмов по очистке, сроков проведения промывок и величины промывного расхода, которые обеспечили бы наиболее благоприятное регулирование режима мутности в отстойнике и высокоэффективное использование механизмов на очистке. Для наиболее благоприятного регулирования режима мутности нужно создать в отстойнике такие условия, при которых величина выходящей мутности будет близка к расчетному ее значению.

Расчет отстойника включает следующие разделы:

1) определение расчетной мутности при входе в отстойник и состава взвешенных наносов;

2) установление расчетной мутности при выходе из отстойника;

3) выбор размеров отстойника и расчет динамики осаждения наносов;

4) расчет заиления и очистки отстойника и определение потребной мощности парка механизмов;

5) расчет промыва (при возможности его проведения).

Определение расчетной мутности при входе в отстойник и состава наносов. Расчетную мутность при входе в отстойник определяют по данным многолетних наблюдений в районе водозаборного узла. Если таковых нет, расчетную мутность можно определить по данным ближайшей гидрологической станции на реке с корректировкой на основании наблюдений за мутностью в районе водозабора.

За расчетную мутность принимают среднедекадные мутности, вычисленные по среднему или максимальному по мутности году или же по году, промежуточному между ними.

Выбор расчетного по мутности года в каждом конкретном случае определяют в зависимости от класса сооружения на основе технико-экономического сравнения различных вариантов с учетом использования мощности парка землесосов и подачи воды в канал.

В качестве величин, характеризующих крупность состава, принимают максимальную w_{n+1} и минимальную w_1 гидравлические крупности наносов данного состава.

Значения w_{n+1} и w_1 определяют по средним данным о составе наносов с разбивкой его на три фракции: первая фракция (наиболее мелкие наносы) с удельным содержанием ρ_1 и гидравлической крупностью частиц менее w_2; вторая фракция с удельным содержанием наносов ρ_2 и гидравлической крупностью в пределах w_2 и w_3 и третья фракция $\rho_3 = 1 - (\rho_1 + \rho_2)$ с гидравлической крупностью наносов более w_3.

На гидрологических станциях состав наносов делят на большее число фракций (свыше трех), а предельные крупности дают в диаметрах. При использовании этих данных следует сгруппировать наносы в три фракции. Гидравлические крупности фракций тогда принимают по шкале крупностей, которую принимали

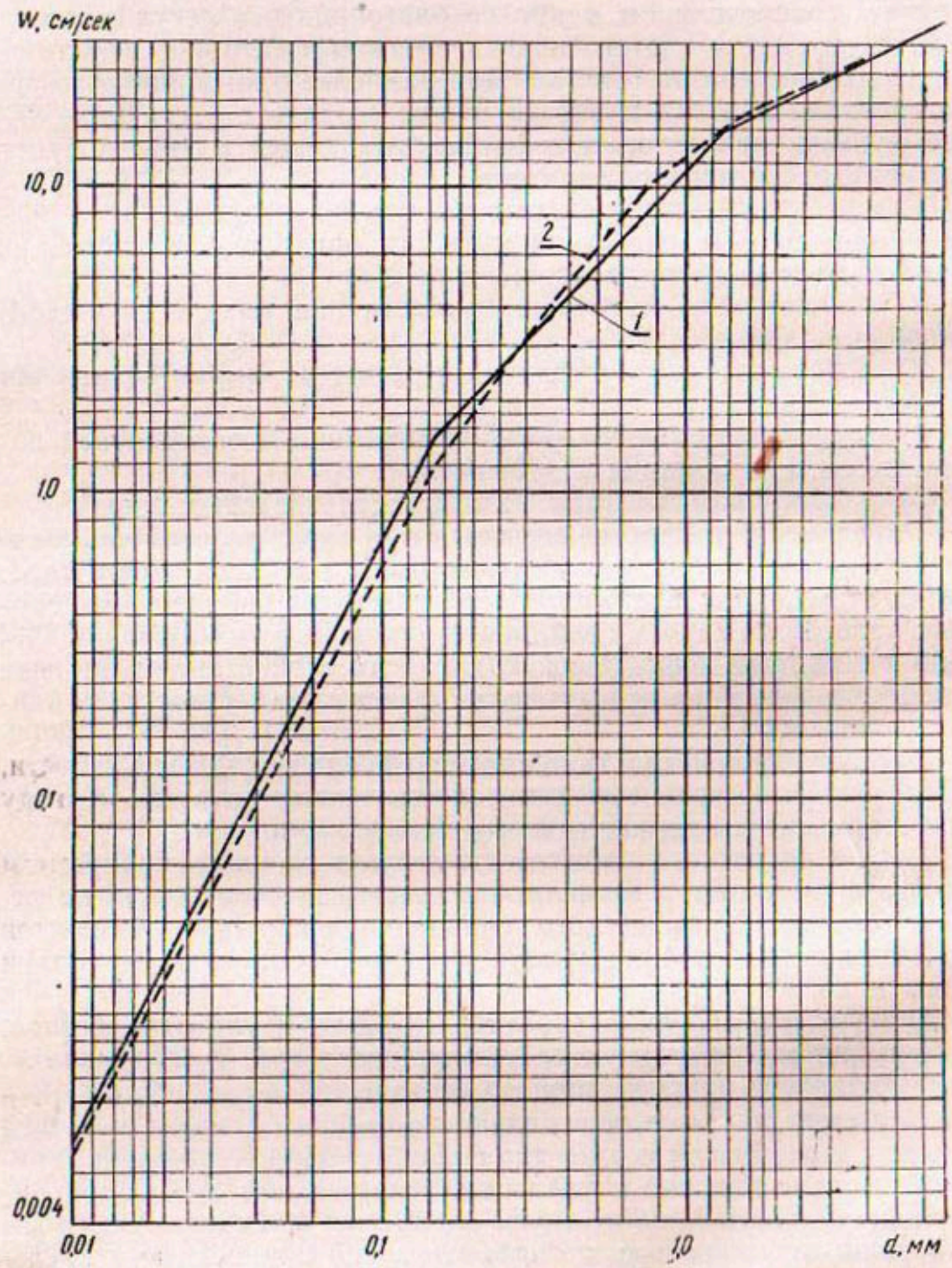


Рис. 11. Кривые зависимости $w=f(d)$ при температуре воды 20° С:
1 — по шкале В. Н. Гончарова; *2* — по шкале А. А. Саркисян.

ТАБЛИЦА 9

Гидравлическая крупность частиц наносов w, *мм/сек*

Диаметр частиц d, *мм*	Температура воды, град.				
	10	15	20	25	30
0,001	0,00068	0,00079	0,0009	0,001	0,0011
0,010	0,068	0,079	0,09	0,100	0,110
0,015	0,154	0,178	0,21	0,225	0,253
0,02	0,274	0,316	0,36	0,400	0,450
0,05	1,717	1,973	2,27	2,500	2,812
0,07	2,51	2,88	3,25	3,65	4,10
0,10	5,12	5,88	6,63	7,44	8,37
0,15	11,50	13,25	14,90	16,75	18,84
0,20	17,11	18,76	20,42	22,06	23,72
0,30	28,31	29,96	31,62	33,26	34,92
0,40	39,51	41,16	42,92	44,46	46,12
0,50	50,71	52,36	54,02	55,66	57,32
0,60	61,91	63,56	65,22	66,86	68,52
0,70	73,11	74,76	76,42	78,06	79,72
0,80	84,31	85,96	87,62	89,26	90,92
0,90	95,71	97,36	99,02	100,46	102,12
1,00	106,71	108,36	110,02	111,66	113,82
1,20	129,11	130,76	132,42	134,06	135,72
1,50	162,71	164,36	166,02	167,66	169,32

ТАБЛИЦА 10

Гидравлическая крупность для крупных наносов

d, *мм*	2	3	4	5	6	7	8	10	15	20	25	30
w, *мм/сек*	190	232,5	268,5	300	329	355	380	425	520	602	672	736

для производства анализа. Если нет данных об этой шкале, а также если имеются крупные фракции $d \geqslant 0{,}1$ *мм*, при переходе от диаметра к гидравлической крупности следует пользоваться таблицами 9 и 10 или графиком (рис. 11), принимая температуру воды среднюю за период.

Гидравлическая крупность принята для частиц с диаметром менее 0,05 *мм* по шкале Стокса и более 0,05 по шкале В. Н. Гончарова.

А. А. Саркисян [23] на основе анализа большого количества данных своих исследований, а также исследований других авторов (Д. Я. Соколова, С. В. Астапова и др.) предложила шкалу гидравлической крупности по кривой, представленной на том же рисунке 11. Как видно из рисунка, эта шкала близка к первой.

В таблицах 9 и 10 даны величины для частиц с удельным весом 2,65 *т/м*^{3} [23]. Для частиц с другим удельным весом γ_1 эти величины нужно умножить на коэффициент β. Значение β опре-

деляют по формулам: для частиц с диаметром до 1,5 *мм* $\beta = 0{,}606\,(\gamma_1 - 1{,}0)$, а для частиц с диаметром более 1,5 *мм* $\beta = 0{,}78\sqrt{\gamma_1 - 1{,}0}$.

Пример 1. Средний состав наносов источников в створе проектируемого отстойника, по данным гидрологической станции, следующий (таблица 11).

ТАБЛИЦА 11

Состав наносов р. Аму-Дарьи в голове канала Куль-Арык

Диаметр частиц d, *мм*	<0,01	0,01–0,015	0,015–0,05	0,05–0,01	>0,1
Удельное содержание фракции ρ_i	$\rho_I = 0{,}143$	$\rho_{II} = 0{,}195$	$\rho_{III} = 0{,}478$	$\rho_{IV} = 0{,}156$	$\rho_V = 0{,}028$

Делим наносы на три фракции: 1-я фракция $< 0{,}015$ *мм*, $\rho_1 = 0{,}338$; 2-я фракция 0,015—0,05 *мм*, $\rho_2 = 0{,}478$ и 3-я фракция $> 0{,}05$ *мм*, $\rho_3 = 0{,}184$.

Средняя температура воды за поливной период $t = 20°$.

По таблице 9 находим, что при удельном весе 2,65 для частиц $d = 0{,}015$ *мм* $w_2 = 0{,}21$ *мм/сек* и для $d = 0{,}05$ *мм* $w_3 = 2{,}27$ *мм/сек*.

Для получения более надежных результатов фракции с малым удельным содержанием объединены: наносы с крупностью менее 0,01 *мм* и от 0,01 до 0,015 *мм* в одну первую фракцию ($\rho_1 = \rho_I + \rho_{II}$) и крупностью от 0,05 до 0,1 и более 0,1 *мм* — в третью фракцию ($\rho_3 = \rho_{IV} + \rho_V$). Если расчет отстойников ведут для большого осветления потока при условии $\frac{\rho_в}{\rho_0} \leqslant \rho_I$, лучше первую фракцию принимать $\rho_1 = \rho_I$, а остальную часть наносов делить на две фракции.

Значения максимальной w_{n+1} и минимальной w_1 крупностей определяют по формулам, которые выведены на основании зависимости (8):

$$\ln w_{n+1} + \frac{(1+a)\,w_3 - w_2}{a w_{n+1}} = \frac{(1+a)\ln w_3 - \ln w_2 + a}{a} \tag{26}$$

и

$$\ln w_1 - \frac{w_1}{w_{n+1}} = \frac{\ln w_2 - \frac{w_2}{w_{n+1}} - \rho_1 (\ln w_{n+1} - 1)}{1 - \rho_1}, \tag{27}$$

где $a = \frac{\rho_2}{\rho_3}$.

Решение уравнений (26) и (27) дает по два значения для w_{n+1} и w_1. В расчетах нужно взять те из них, которые удовлетворяют условиям $w_{n+1} > w_3$ и $w_1 < w_2$.

Пример 2. Определим максимальную и минимальную крупность наносов для состава, приведенного в примере 1, где

$$a = \frac{\rho_2}{\rho_3} = \frac{0,478}{0,184} = 2,6.$$

Подставляя в формулу (26) значения a, w_2 и w_3, получим:

$$\ln w_{n+1} + \frac{(1 + 2,6)\,2,27 - 0,21}{2,6\,w_{n+1}} = \frac{(1 + 2,6)\ln 2,27 - \ln 0,21 + 2,6}{2,6},$$

или $\ln w_{n+1} + \frac{3,06}{w_{n+1}} = 2,73$, откуда подбором получаем $w_{n+1} = 12$ *мм/сек*.

Далее определяем значение w_1 по формуле (27):

$$\ln w_1 - \frac{w_1}{12,0} = \frac{\ln 0,21\,\frac{0,21}{12} - 0,338\,(\ln 12 - 1)}{1 - 0,338}$$

или $\ln w_1 - 0,083 w_1 = -3,14$, откуда $w_1 = 0,042$ *мм/сек*.

Для расчетов в стадии проектного задания для наносов р. Аму-Дарьи можно принять следующие значения предельных крупностей, помещенные в таблице 12.

ТАБЛИЦА 12

Предельные гидравлические крупности наносов р. Аму-Дарьи

Участок реки	Значение гидравлической крупности, *мм/сек*	
	w_1	w_{n+1}
В районе Керки	0,06	17,8
В районе Чарджоу	0,04	14,5
В низовьях реки	0,02	11,8

Величина расчетной мутности при выходе из отстойника. Расчетную мутность потока на выходе из отстойника нужно назначать, исходя из транспортирующей способности мелких каналов оросительной сети, заиления которых нельзя допускать. При этом следует обеспечить неразмываемость русел крупных каналов за отстойником и транспортирование возможно большего количества мелких полезных наносов на орошаемые земли. Это достигают путем устройства внутрисистемных отстойников для последовательного осветления потока, а в отдельных случаях допускают некоторое заиление мелких постоянных оросителей.

В каждом случае после технико-экономического сравнения различных вариантов определяют каналы оросительной сети, заиление которых необходимо предотвратить, или расчетную степень осветления потока в отстойнике, а также размещение отстойников на оросительных системах.

Величина расчетной мутности $\rho_{расч}$ определяется, как средняя для каждой декады за поливной период, по формуле:

$$\rho_{расч} = \eta\rho_{кр}, \tag{28}$$

где $\rho_{кр}$ — критическая мутность потока в канале водопроводящей сети;

η — коэффициент полезного действия системы до канала, для которого рассчитывается критическая мутность.

Для головных отстойников оросительных систем, при наличии внутрисистемных отстойников, величину критической мутности определяют для канала проводящей сети до этих отстойников. При отсутствии внутрисистемных отстойников, а также для последних критическую мутность определяют на последнем звене незаиляемых каналов оросительной системы.

Определяющим элементом при расчете величины критической мутности является транспортирующая способность потока.

Транспортирующей способностью потока называется то предельное количество наносов, которое во взвешенном состоянии при данных гидравлических элементах потока может перемещать 1 $м^3$ воды. При этом предполагается, что в поток подается достаточное количество наносов всех необходимых для него крупностей. Транспортирующую способность потока вычисляют по формуле (9).

При уменьшении транспортирующей способности в потоке образуется избыток наносов $\rho_и$, который определяется формулой (13).

До известного уменьшения транспортирующей способности этот избыток наносов состоит из более крупных наносов с наименьшей гидравлической крупностью частиц w_x, определяемой по формуле (12).

При $w_x \leqslant w_1$ избыточное количество наносов состоит из всех крупностей начальной мутности и определяется по формуле (13), но с заменой в ней w_x на w_1. Если $u_в \leqslant w_1$, то транспортирующая способность потока для заданного состава наносов равна нулю. Тогда второй член правой части уравнения (13) также превратится в нуль, а величина избыточной мутности будет:

$$\rho_и = c_0\left(\ln\frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1}-w_1}{w_{n+1}}\right). \tag{29}$$

В формулах (12), (13) и (29) значение постоянной кривой распределения наносов начальной мутности c_0 определяется зависимостью (7).

Количество наносов, оставшееся в потоке после осаждения избытка наносов, отнесенное к единице объема воды, составляет критическую мутность потока $\rho_{кр}$ и определяется по формуле (14).

При $w_x \leqslant w_1$ значение $\rho_{кр}=\rho_т$ и определяется по формуле (9), а при $u_в \leqslant w_1$ $\rho_{кр}=\rho_т=0$.

Основные размеры отстойника: рабочую ширину B, глубину H и длину L определяют на основании технико-экономического сравнения ряда вариантов с различной шириной отстойника и соответствующих ей глубины и длины отстойника.

Ширину одной камеры в двухкамерном отстойнике с механизированной очисткой назначают из расчета сбрасывания пульпы на один берег.

Для отстойников с гидравлической или комбинированной очисткой ширину отстойника необходимо выбирать с учетом возможного сокращения промывного расхода и лучшего его использования.

Определение потребной длины и глубины отстойника при выбранной ширине B и при $u_в > w_1$ ($\rho_т > 0$) производится следующим образом.

1. Для месяца, имеющего близкую к средней за поливной период мутность, строят кривые зависимости наивыгоднейшей глубины H от объема отстойника $H=f(V)$ (рис. 12) по уравнениям:

для условий второй расчетной области при $w_{n+1} > \frac{q}{L} > u_в$

$$\frac{c_0}{H} - \frac{c_0 Q}{2w_{n+1}V} - \left[\left(1 - \frac{w_1}{2w_{n+1}}\right)\frac{c_0 w_1}{H^2} + \left(\frac{14t}{H^{11/6}} - 17w_1\right)\frac{200t}{6H^{23/6}}\right]\cdot\frac{V}{Q} = 0; \quad (30а)$$

для условий третьей расчетной области $\left(\frac{q}{L} < u_в\right)$

$$\frac{c_0}{H} + \frac{QS}{2V} - \left(\frac{Sw_1}{2} + c_0\right)\frac{w_1 V}{QH^2} - \left(17 + 11\ln\frac{Vt}{Q} - 31{,}2\ln H - \frac{17\,w_1 V}{QH}\right)\frac{200\,t}{6H^{17/6}} = 0, \quad (30б)$$

в которых $t = 0{,}065\,n^{1/2}\,q^{3/2}$, $S = \frac{c_т}{u_в} - \frac{c_0}{w_{n+1}}$,

где Q и q — полный и удельный расходы для расчетной декады;
n — коэффициент шероховатости.

2. Для различных значений оптимальных глубин и соответствующих им объемам и длинам отстойника при помощи уравнений (35 б—в) вычисляют мутности на выходе из отстойника и строят кривую $\rho_в = f(V)$ (рис. 12).

3. По кривым $\rho_в = f(V)$ и $H = f(V)$ находят потребные объем, глубину и длину отстойника, при которых мутность на выходе из него $\rho_п$ будет совпадать с расчетной мутностью для принятой декады.

Значение глубины H принимают в пределах минимальной H_{min}, определяемой из условия обеспечения водоподачи при низких уровнях, и максимальной H_{max} — по условиям очистки отстойника. Если по кривой $H=f(V)$ величина H выходит из указанных пределов, то расчетное значение глубины H принимают равной H_{min}, если по кривой $H<H_{min}$, и H_{max}, если по кривой $H>H_{max}$.

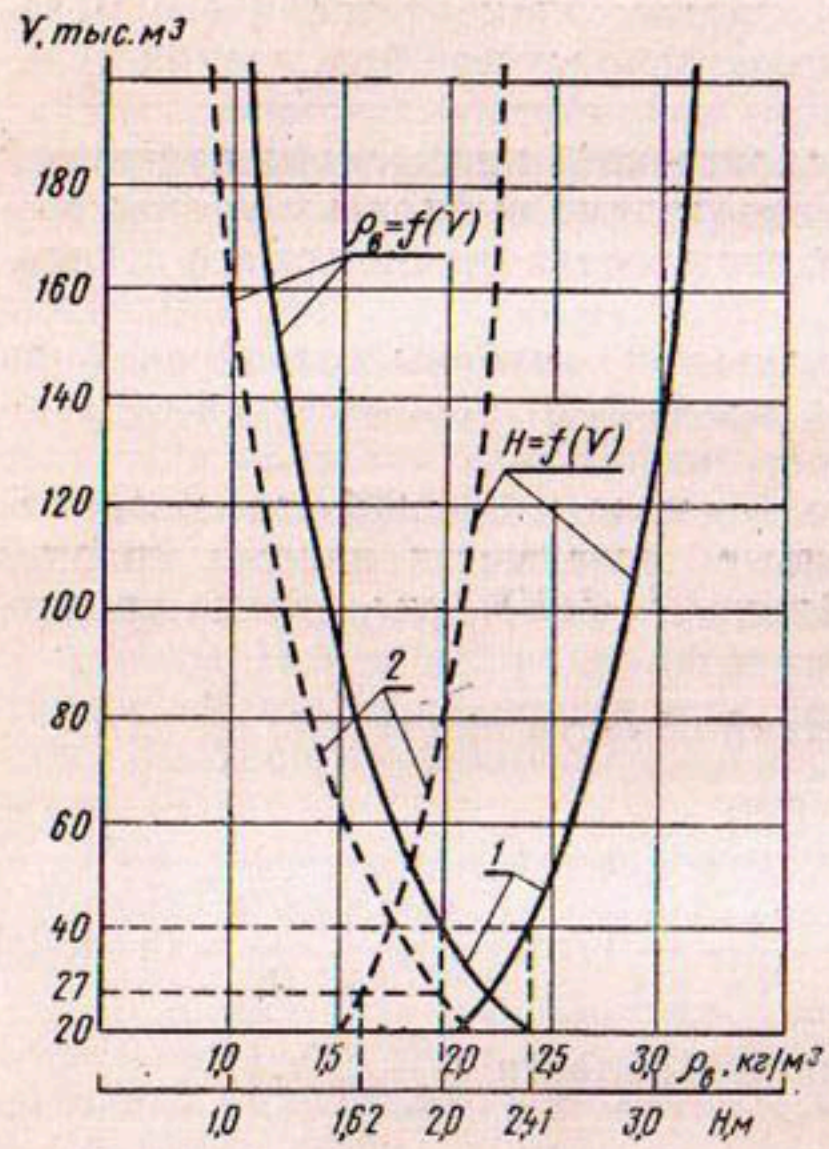


Рис. 12. Кривые зависимости $\rho_в=f(V)$ и $H=f(V)$ для отстойника с расходом воды 20 $м^3/сек$ и начальной мутностью потока 3,7 $кг/м^3$ для $B=25$ м (1); $B=40$ м (2).

Уравнения (30а) и (30б) выведены для отстойников, транспортирующая способность которых не равна нулю, поэтому ими нужно пользоваться при проектировании отстойников, для которых $u_в>w_1$.

При транспортирующей способности потока в отстойнике равной нулю ($u_в \leqslant w_1$) размеры его (длина и глубина) определяются так:

а) подбором вычисляют значение w_H при помощи уравнений для условий первой расчетной области ($w_H>w_{n+1}$) по формуле:

$$\rho_в = \rho_0 - \frac{1}{2w_H} \cdot \frac{c_0}{w_{n+1}} (w_{n+1} - w_1)^2 \ кг/м^3, \quad (31а)$$

для условий второй расчетной области ($w_H < w_{n+1}$) по формуле:

$$\rho_в = \rho_{0\,(w_1,\ w_H)} - \frac{1}{2w_H} \cdot \frac{c_0}{w_{n+1}} (w_H - w_1)(2w_{n+1} - w_H - w_1) \ кг/м^3, \quad (31б)$$

где ρ_0 — мутность для среднего расчетного месяца;

$\rho_в$ — мутность, которую необходимо иметь на выходе из отстойника;

$\rho_{0(w_1,\ w_H)}$ — мутность, определяемая по формуле (23);

б) при заданной ширине B и расходе воды Q за расчетный месяц определяют длину отстойника по формуле:

$$L = \frac{Q}{Bw_H}; \quad (32)$$

в) глубину потока в отстойнике принимают с учетом размещения осевших наносов за период между очистками, условий зимнего режима и работы землесосов.

При крупном составе наносов источника и малых скоростях течения воды в защищаемых от заиления каналах может оказаться, что $u_в \leqslant w_1$, где $u_в$ — взвешивающая скорость потока в канале, вычисляемая по формуле (10). В таком случае в отстойнике задерживаются все наносы, а размеры отстойника при заданной ширине B определяются:

глубина воды H из уравнения (33) подбором

$$w_1 = 0{,}065\left(\frac{q}{H} - 0{,}05\right) i^{1/4}, \tag{33}$$

длина отстойника L по равенству

$$L = 1{,}15\frac{q}{w_1}. \tag{34}$$

Полученные размеры отстойника уточняют впоследствии при производстве подекадного расчета, при котором учитывают заиление и очистку отстойника.

Расчет осаждения наносов в головных отстойниках. Уравнения динамики мутности в отстойнике для равномерного режима потока при $u_в > w_1$ даны для следующих трех расчетных областей:

для первой области при $w_H > w_{n+1}$

$$\rho_{x_I} = \rho_{H_I} - \frac{1}{2w_H}[a_0 d_0 - a_т d_т]\ кг/м^3; \tag{35а}$$

для второй области при $w_{n+1} > w_H > u_в$

$$\rho_{x_{II}} = \rho_{H_{II}} - \frac{1}{2w_H}\left[a_0 b_{0(w_{\min}, w_H)} - a_т d_т\right]\ кг/м^3; \tag{35б}$$

для третьей области при $u_в > w_H$

$$\rho_{x_{III}} = \rho_{H_{III}} - \frac{1}{2w_H}\left[a_0 b_{0(w_{\min}, w_H)} - a_т b_{т(w_{\min}, w_H)}\right]\ кг/м^3, \tag{35в}$$

где w_H — наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов избыточной мутности у дна на расстоянии L_x от начала отстойника, определяемая по формуле:

$$w_H = \frac{vH}{L_x} = \frac{q}{L_x}, \tag{36}$$

ρ_{H_I}, $\rho_{H_{II}}$, $\rho_{H_{III}}$ — мутность потока у дна в пределах соответствующих областей

$$\rho_{H_I} = \rho_0; \tag{37а}$$

$$\rho_{H_{II}} = c_0\left(\ln\frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}}\right); \tag{37б}$$

$$\rho_{H_{III}} = c_0\left(\ln\frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}}\right) + c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_H} - \frac{u_в - w_H}{u_в}\right); \quad (37в)$$

$$a_0 = \frac{c_0}{w_{n+1}}; \quad (38а)$$

$$b_{0(w_{min}, w_H)} = (w_H - w_{min})(2w_{n+1} - w_H - w_{min}); \quad (38б)$$

$$d_0 = (w_H - w_{min})^2; \quad (38в)$$

$$a_т = \frac{c_т}{u_в}; \quad (39а)$$

$$b_{т(w_{min}, w_H)} = (w_H - w_{min})(2u_в - w_H - w_{min}); \quad (39б)$$

$$d_т = (u_в - w_{min})^2. \quad (39в)$$

При $w_x \leqslant w_1$ принимают $w_{min} = w_1$ и при $w_x > w_1$ $w_{min} = w_x$, $u_в$ и $c_т$ определяют по гидравлическим элементам отстойника.

Если при решении уравнения (36) получится, что $w_H \leqslant w_{min}$, то мутность потока в створе, для которого определяется w_H, вычисляют по формулам:

при $w_{min} = w_x$

$$\rho_x = c_0\left(\ln\frac{w_x}{w_1} - \frac{w_x - w_1}{w_{n+1}}\right) + c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в}\right), \quad (40)$$

при $w_{min} = w_1$

$$\rho_x = c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_1} - \frac{u_в - w_1}{u_в}\right) = \rho_т. \quad (41)$$

Мутность потока в отстойнике с гидравлическим режимом, при котором получается $u_в \leqslant w_1$ ($\rho_т = 0$), определяют:

для условий первой расчетной области при $w_H > w_{n+1}$ по формуле:

$$\rho_{x_I} = \rho'_{H_I} - \frac{1}{2w_H} a_0 d'_0, \quad (42а)$$

где $d'_0 = (w_{n+1} - w_1)^2$;

для условий второй расчетной области при $w_H < w_{n+1}$ по формуле:

$$\rho_{x_{II}} = \rho'_{H_{II}} - \frac{1}{2w_H} a_0 b_0, \quad (42б)$$

где

$$\rho'_{H_I} = \rho_0, \quad \rho'_{H_{II}} = c_0\left(\ln\frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}}\right).$$

Здесь в обозначениях b_0 и d_0 наименьшая гидравлическая крупность частиц наносов составляет $w_{min} = w_1$.

Уравнения (35 а—в) могут быть применены для расчета динамики осаждения в начальный период работы отстойника или в отстойниках с непрерывным промывом. Кроме того, по этим уравнениям с известным приближением можно определить величину выходящей из отстойника мутности по средним на всей длине отстойника гидравлическим элементам.

Расчет осаждения наносов во внутрисистемных отстойниках. Внутрисистемные отстойники рассчитывают с учетом первичного осветления потока в головном отстойнике и коэффициента полезного действия каналов до этих отстойников η [23].

При наличии на оросительных системах головных и внутрисистемных отстойников в первых поток осветляется обычно не сильно. В связи с этим для предварительных расчетов мутность на выходе из внутрисистемного отстойника можно определять, как для головного отстойника, по формулам (35 а—в), заменив в них c_0 на $\frac{1}{\eta} c_0$ и ρ_0 на $\frac{1}{\eta}\rho_0$, а количество отложившихся в отстойнике наносов из каждого кубического метра воды, прошедшего через отстойник, подсчитать по формуле:

$$\rho_{з.в} = \frac{1}{\eta}\rho_в - \rho_{в.в}, \qquad (43)$$

где $\rho_в$ и $\rho_{в.в}$ — мутности на выходе из головного и внутрисистемного отстойников.

Этим же методом рассчитывают внутрисистемные отстойники в стадии технического проекта при условии

$$L_в \geqslant \frac{q_в}{\omega_{хг}},$$

где $L_в$ и $q_в$ — длина и удельный расход внутрисистемного отстойника;

$\omega_{хг}$ — наименьшая гидравлическая крупность избытка наносов в головном отстойнике, определяемая по формуле (12).

Расчет заиления и очистки отстойника. Для предварительных расчетов и в стадии проектного задания объем подлежащих осаждению в отстойнике взвешенных наносов $V_з$ определяется по среднедекадным значениям начальной и расчетной мутностей:

$$V_з = \frac{86{,}4tQ}{\gamma_H}(\rho_0 - \rho_{расч}), \qquad (44)$$

где t — время, за которое определяется объем осаждения, сутки;

Q — расход воды в отстойнике, *м³/сек*;

γ_H — объемный вес взвешенных наносов ($\gamma_H = 1{,}25$ *т/м³*).

Для внутрисистемного отстойника в формуле (44) ρ_0 заменяется на мутность в начале этого отстойника.

Расчетный годовой объем наносов, которые необходимо осадить в отстойнике, определяется как сумма декадных объемов. В объем заиления отстойника нужно включить и донные наносы, если для недопущения их в канал в голове его не предусмотрены специальные мероприятия. Объемный вес этих наносов принимается в пределах 1,4—1,5 $т/м^3$.

Потребную мощность парка механизмов выбирают в соответствии с расчетным объемом заиления за год с учетом регулирования нужного режима мутности в отстойнике и равномерной загрузки механизмов в течение всего года.

Для уточнения объема заиления отстойника, распределения наносов и расстановки очистных механизмов в стадии технического проекта производят подекадный расчет заиления отстойника по участкам, учитывая изменение гидравлического режима в отстойнике в связи с его заилением и очисткой.

Гидравлические элементы потока для участка i за n-ную декаду (n — число декад работы отстойника) составляют:

$$H_{ni} = H_{0п} + \sum_{1}^{n-1} \delta_i \; м, \tag{45}$$

$$v_{ni} = \frac{Q_n}{(B + mH_{ni})\, H_{ni}} \; м/сек, \tag{46}$$

где $H_{0п}$ — полная глубина в отстойнике за декаду при отсутствии заиления;

δ_i — величина изменения средней отметки дна на участке i за каждую декаду;

Q_n — расход воды в отстойнике в расчетной декаде;

B — ширина по дну;

m — заложение откосов.

Величина δ_i определяется по формуле:

$$\delta_i = \left[\frac{86{,}4tQ}{\gamma_H}\left(\rho_{x_{i-1}} - \rho_{x_i}\right) - V_{0i}\right]\frac{1}{Bl_i} \; м, \tag{47}$$

где $\rho_{x_{i-1}}$ и ρ_{x_i} — мутности в начале и в конце участка в рассматриваемой декаде, вычисленные по формулам динамики мутности;

l_i — длина участка i отстойника;

V_{0i} — объем очистки (промывкой и механизмами) на участке i за рассматриваемую декаду;

Q — расход воды в отстойнике в рассматриваемой декаде.

Объем заиления за декаду на участке i составляет:

$$V_{зi} = \frac{86{,}4tQ}{\gamma_H}\left(\rho_{x_{i-1}} - \rho_{x_i}\right) м^3. \tag{48}$$

Общее заиление отстойника за декаду будет:

$$V_з = \sum_{i=1}^{i=s} V_{зi}, \qquad (49)$$

где s — число участков, на которое разделен отстойник.

Для обеспечения более равномерной и продолжительной работы парка очистных механизмов в отстойнике создают некоторый резервный объем путем дополнительного его заглубления. При расчетах отстойника значение полной расчетной глубины принимают с учетом этого заглубления.

Глава II

Расчет промыва ирригационных отстойников

Одним из эффективных средств удаления наносов из оросительных систем является способ промыва отстойников и заиленных каналов, при котором используется энергия водного потока. Гидравлический способ удаления наносов широко применяется на отстойниках для гидростанций. Однако опыт промывки ирригационных отстойников показывает, что этот способ и для оросительных систем во многих случаях значительно экономнее по сравнению с очисткой их землесосами или экскаваторами.

Метод расчета гидравлических промывок отстойников [13], расположенных при гидростанциях, в силу специфических особенностей их (малая длина отстойника, осаждение крупных наносов и наличие большого перепада) не может быть использован при промыве отстойников оросительных систем. В последнее время разработан ряд методов расчета для промыва ирригационных отстойников, но эти методы, в которых гранулометрический состав наносов характеризуется условной величиной средней гидравлической крупности, имеют ограниченную область применения.

Как было показано выше, предложенный автором метод расчета транспортирующей способности потока и осаждения наносов в отстойнике, основанный на закономерности в распределении по крупности насыщающих поток наносов, в котором наиболее полно учитываются условия формирования наносного режима и свойства турбулентного потока, дает более близкие к натуре результаты и имеет широкую область применения. Метод осаждения наносов в отстойниках позволяет определять закономерность распределения отложившихся наносов по крупности.

С использованием указанных закономерностей был разработан метод расчета промыва отстойников. В процессе его разработки дополнительно были решены некоторые вопросы, связанные с уточнением и упрощением этого метода. Исследования, проведенные в последние годы Г. А. Тер-Абрамянцем [21], А. Г. Нацвлишвили [18], показали, что расчет промыва отстойников также дает удовлетворительное совпадение с натурой.

§ 5. Состав отложившихся в отстойнике наносов

Интенсивность размыва и степень насыщения потока наносами при промыве отстойника существенно зависят от состава отложившегося в нем грунта. А это влияет на производительность и расстановку машин по очистке. Поэтому прежде чем приступить к разбору вопросов, связанных непосредственно с размывом и транспортированием наносов, приведем метод определения количества и фракционного состава продукта размыва и распределения отложений по длине отстойника.

Методика определения количества и состава осевших в отстойнике наносов в межпромывные периоды изложена в книге «Отстойники на оросительных системах». Ниже приведены лишь основные расчетные зависимости, которые потребуются при расчете промывок.

Продуктом размыва при промыве являются наносы избыточной мутности, которые осаждаются в отстойнике в межпромывные периоды[1]. Состав этой мутности характеризуется предельными крупностями $w_{1з}$ и $w_{(n+1)з}$ при $u_{вз}=w_{mз}$ и $w_{xз}$ и $w_{(n+1)з}$ при $u_{вз}>w_{mз}$,

где $w_{1з}$ и $w_{(n+1)з}$ — наименьшая и наибольшая гидравлические крупности частиц взвешенных наносов, поступающих в отстойник;

$w_{mз}$ — наибольшая гидравлическая крупность частиц, которыми из наносов начальной (речной) мутности может быть полностью насыщен поток в отстойнике.

Значение $w_{mз}$ определяется по формуле:

$$w_{mз}=0{,}005c_{0з}\frac{w_{(n+1)з}-w_{1з}}{w_{(n+1)з}}+w_{1з}, \tag{50}$$

где $c_{0з}$ — постоянная кривой распределения по крупности наносов начальной мутности.

$$c_{0з}=\frac{\rho_{0з}}{\ln\dfrac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}}-\dfrac{w_{(n+1)з}-w_{1з}}{w_{(n+1)з}}}\ кг/м^3, \tag{51}$$

$\rho_{0з}$ — начальная (речная) мутность в межпромывной период;

---

[1] В настоящем разделе элементы наносного и гидравлического режима потока при заилении обозначаются дополнительным индексом «з» и представляют собой их осредненные значения за период между промывами в отличие от ρ_0, $\rho_т$, w_{n+1}, w_1 и других, приведенных в главе I, обозначающих средние значения для расчетных периодов осаждения наносов в отстойнике.

$w_{xз}$ — наименьшая гидравлическая крупность частиц наносов избыточной мутности при отсутствии в начальном составе наносов достаточного количества мелких частиц для насыщения потока.

Величину $w_{xз}$ находят по формуле:

$$w_{xз} = \frac{c_{тз} - c_{0з}}{a_{тз} - a_{0з}} \text{ м/сек}, \tag{52}$$

где $a_{тз} = \frac{c_{тз}}{u_{вз}}$;

$$a_{0з} = \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}}.$$

Если по формуле (52) получается $w_{xз} \leqslant w_{1з}$, то значение $w_{xз}$ принимают равным $w_{1з}(w_{xз} = w_{1з})$.

$c_{тз}$ — постоянная кривой распределения наносов, которые поток в состоянии транспортировать при насыщении его частицами всех крупностей.

$$c_{тз} = 200 u_{вз} \text{ кг/м}^3, \tag{53}$$

где $u_{вз}$ — наибольшая взвешивающая скорость потока в отстойнике при отстаивании наносов:

$$u_{вз} = 0{,}065\,(v_з - 0{,}05)\,i_з^{1/4} \text{ м/сек}. \tag{54}$$

Здесь $v_з$ — средняя скорость потока;

$i_з$ — уклон свободной поверхности при отстаивании наносов.

Ниже приведен расчет при значениях $u_{вз} < w_{тз}$.

Общее количество избыточных наносов в начале отстойника равно разности начальной мутности и транспортирующей способности потока. На рисунке 13 оно представлено площадью, ограниченной осями координат и кривой *3* $(j_{из} = j_{0з} - j_{тз})$.

$$\rho_{из} = \rho_{0з[\,w_{1з}, w_{(n+1)з}\,]} - \rho_{тз(\,w_{1з},\, u_{вз})} \text{ кг/м}^3, \tag{55}$$

где

$$\rho_{0з\,[\,w_{1з}, w_{(n+1)з}]} = c_{0з}\left(\ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} - \frac{w_{(n+1)з} - w_{1з}}{w_{(n+1)з}}\right) \text{ кг/м}^3, \tag{56}$$

$$\rho_{тз(\,w_{1з},\, u_{вз})} = c_{тз}\left(\ln \frac{u_{вз}}{w_{1з}} - \frac{u_{вз} - w_{1з}}{u_{вз}}\right) \text{ кг/м}^3. \tag{57}$$

Для удобства сравнения на рисунках ординаты кривых распределения $\rho_{0з}$ и $\rho_{тз}$ уменьшены соответственно на $\frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}}$ и $\frac{c_{тз}}{u_{вз}}$.

Ордината кривой распределения по крупности избыточной мутности будет в пределах $w_{1з} < w < u_{вз}$:

$$j_{из} = j_{0з} - j_{тз}\frac{\text{кг/м}^3}{\text{м/сек}}, \tag{58а}$$

а в пределах $u_{вз} < w < w_{(n+1)з}$:

$$j_{из} = j_{0з} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (58б)$$

Ордината кривой распределения начальной мутности при отстаивании наносов составляет $j_{0з} = \frac{c_{0з}}{w} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)_з}}$ и кривой распределения транспортирующей потоком мутности $j_{тз} = \frac{c_{тз}}{w} - \frac{c_{тз}}{u_{вз}}$.

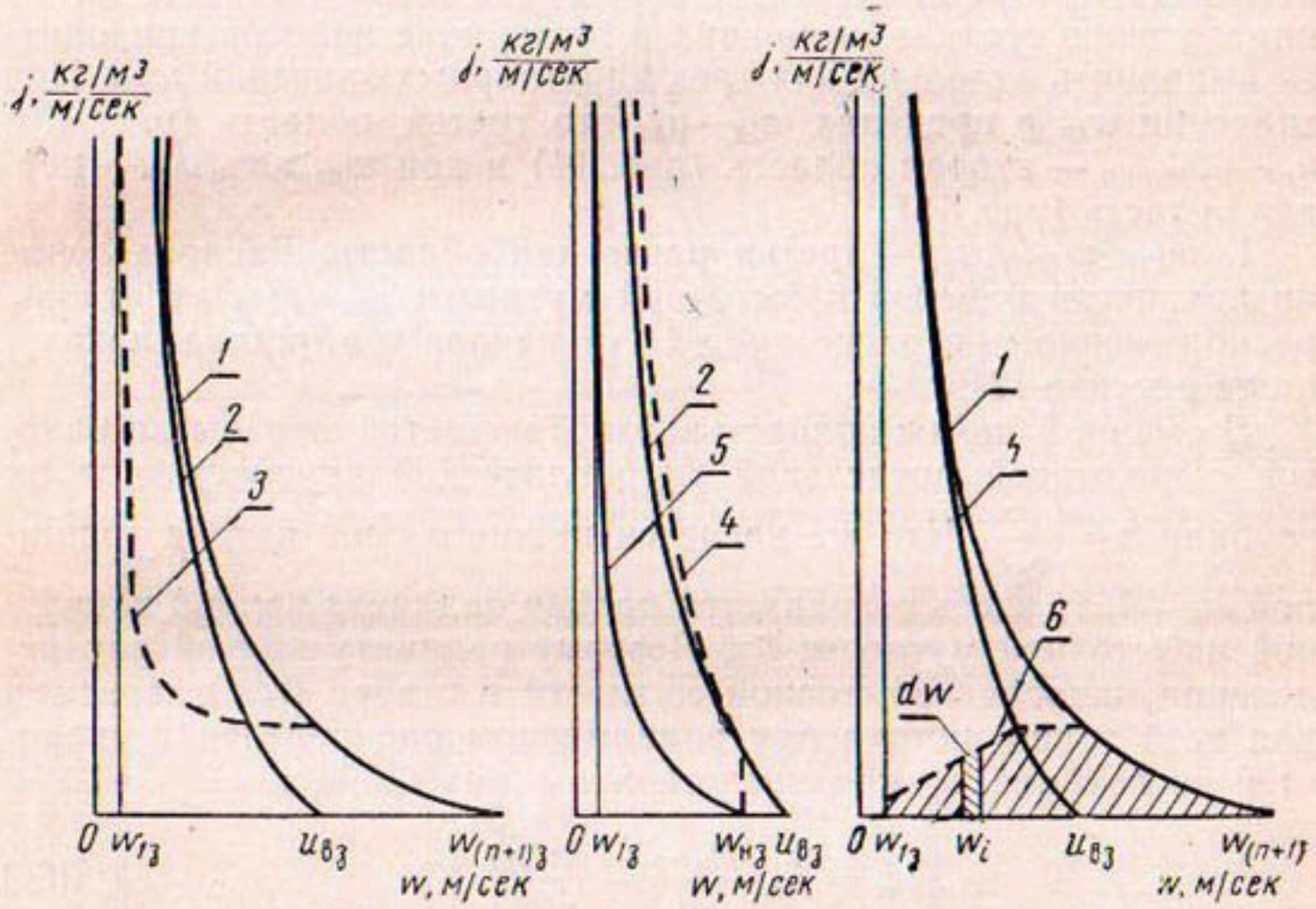


Рис. 13. Кривые распределения по крупности наносов при $w_{1з} < w_{нз} < u_{вз}$:

1 — начальной мутности; *2* — мутности, соответствующей транспортирующей способности потока в отстойнике; *3* — избыточной мутности потока в начале отстойника; *4* — полной мутности в том же створе отстойника; *5* — избыточной мутности в отстойнике на расстоянии L_x от начала его; *6* — осевших в отстойнике наносов.

На некотором расстоянии L_x от начала отстойника на дно выпадает только часть наносов избыточной мутности. Количество оставшихся во взвешенном состоянии наносов избыточной мутности в створе L_x отстойника определяется в зависимости от расчетной области по одной из формул (186), (193) и (198) [23].

На указанном расстоянии L_x в отстойнике осаждаются все наносы избыточной мутности крупностью более

$$w_{нз} = \frac{v_з H_з}{L_x} м/сек, \qquad (59)$$

где $v_з$ и $H_з$ — скорость и глубина потока в отстойнике.

Следовательно, избыточное количество оставшихся во взвешенном состоянии наносов в этом створе характеризуется предельными крупностями $w_{1з}=w_{Hз}$.

Как следует из формул (58а) и (58б), уравнение кривой распределения по крупности наносов избыточной мутности, которая образуется в начале отстойника, подвергается изменению в точках, где $w=u_{вз}$ и $w=w_{(n+1)з}$. В этих же точках изменяется кривая распределения оставшихся во взвешенном состоянии наносов избыточной мутности. Поэтому вывод расчетных выражений по определению состава выпавших в отстойнике наносов приходится выполнить отдельно для трех характерных значений $w_{Hз}$. При значении $w_{из}$ в пределах $w_{1з}$—$u_{вз}$ это третья область (рис. 13), $u_{вз}$—$w_{(n+1)з}$ — вторая область (рис. 14) и при $w_{из}>w_{(n+1)з}$ — первая область (рис. 15).

1. $w_{1з}<w_{Hз}<u_{вз}$ — **третья расчетная область.** Распределение по крупности наносов избыточной мутности $j_{их}=f(w)$ в створе, расположенном на расстоянии L_x от начала отстойника, показано на рисунке 13.

В створе L_x поток полностью освобождается от избытка наносов с некоторой предельной гидравлической крупностью w на глубине $h=\frac{L_x w}{v_з}$. Что же касается нижнего слоя потока толщиной $H_з-h$, то здесь сохраняется полная ордината кривой начальной избыточной мутности $j_{из}$. Поэтому ординату кривой распределения наносов избыточной мутности в створе L_x, в среднем для всей толщи потока при равномерном распределении скоростей по глубине, можно представить в виде:

$$j_{их}=j_{из}\frac{H_з-h}{H_з}\ \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (60)$$

Заменив в (60) $H_з$ и h соответственно на $\frac{L_x}{v_з}w_{Hз}$ и $\frac{L_x}{v_з}w$, получим:

$$j_{их}=j_{из}\frac{w_{Hз}-w}{w_{Hз}}=j_{из}-j_{из}\frac{w}{w_{Hз}}\ \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (61)$$

Подставляя соответствующее значение $j_{из}$, можно получить формулу для вычисления $j_{их}$. Для рассматриваемого случая ($w_{Hз}<u_{вз}$) значение $j_{из}$ определяют по формуле (58а). В соответствии с этим

$$j_{их}=j_{оз}-j_{тз}-(j_{оз}-j_{тз})\frac{w}{w_{Hз}}\ \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (61а)$$

Уравнение (61 а) позволяет построить кривую распределения по крупности наносов избыточной мутности в отстойнике на любом расстоянии от его начала.

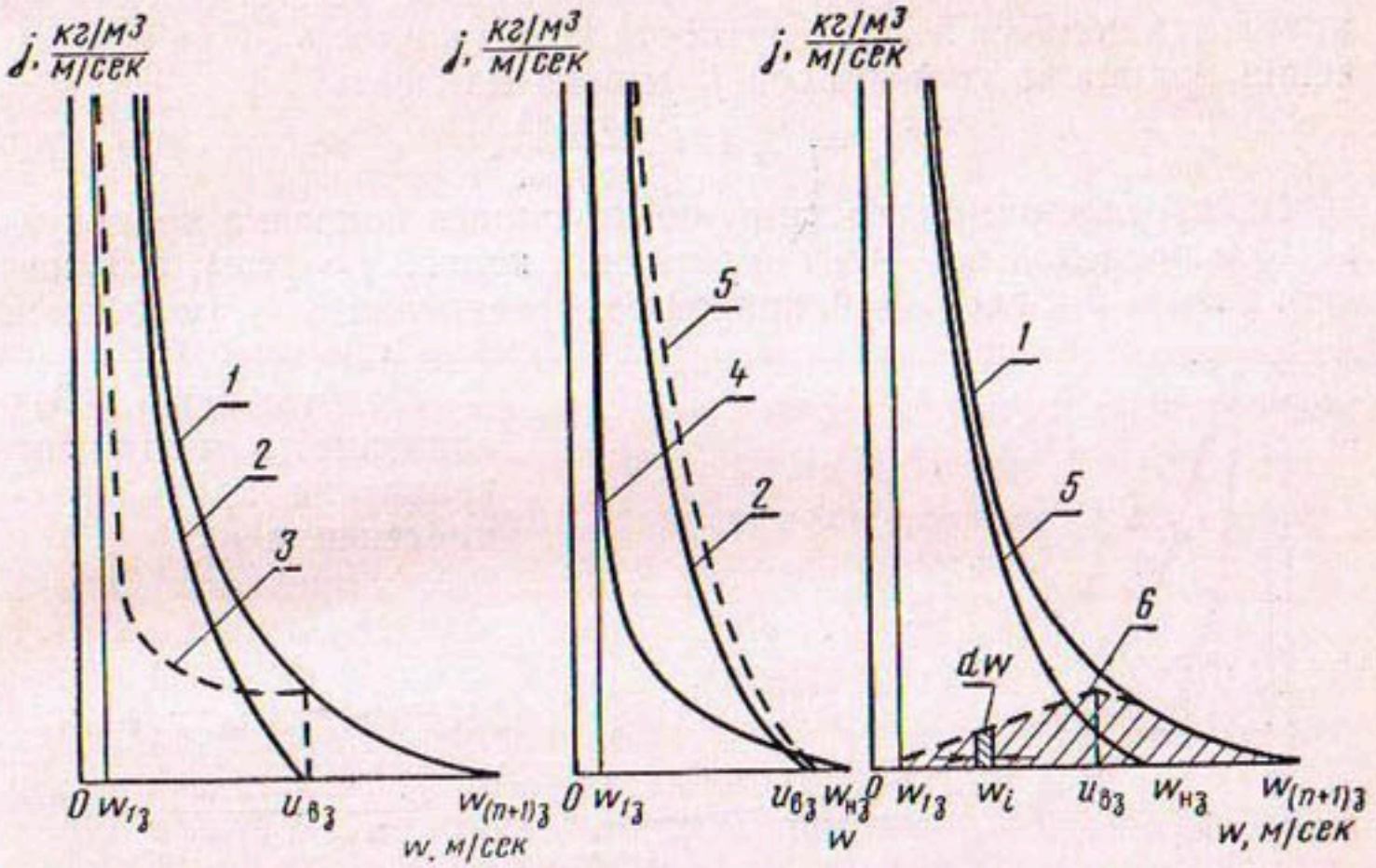


Рис. 14. Кривые распределения по крупности наносов при $u_{вз} < w_{нз} < w_{(n+1)з}$:

1 — начальной мутности; *2* — мутности, соответствующей транспортирующей способности потока в отстойнике; *3* — избыточной мутности потока в начале отстойника; *4* — избыточной мутности в отстойнике на расстоянии L_x от начала его; *5* — полной мутности в том же створе отстойника; *6* — осевших в отстойнике наносов.

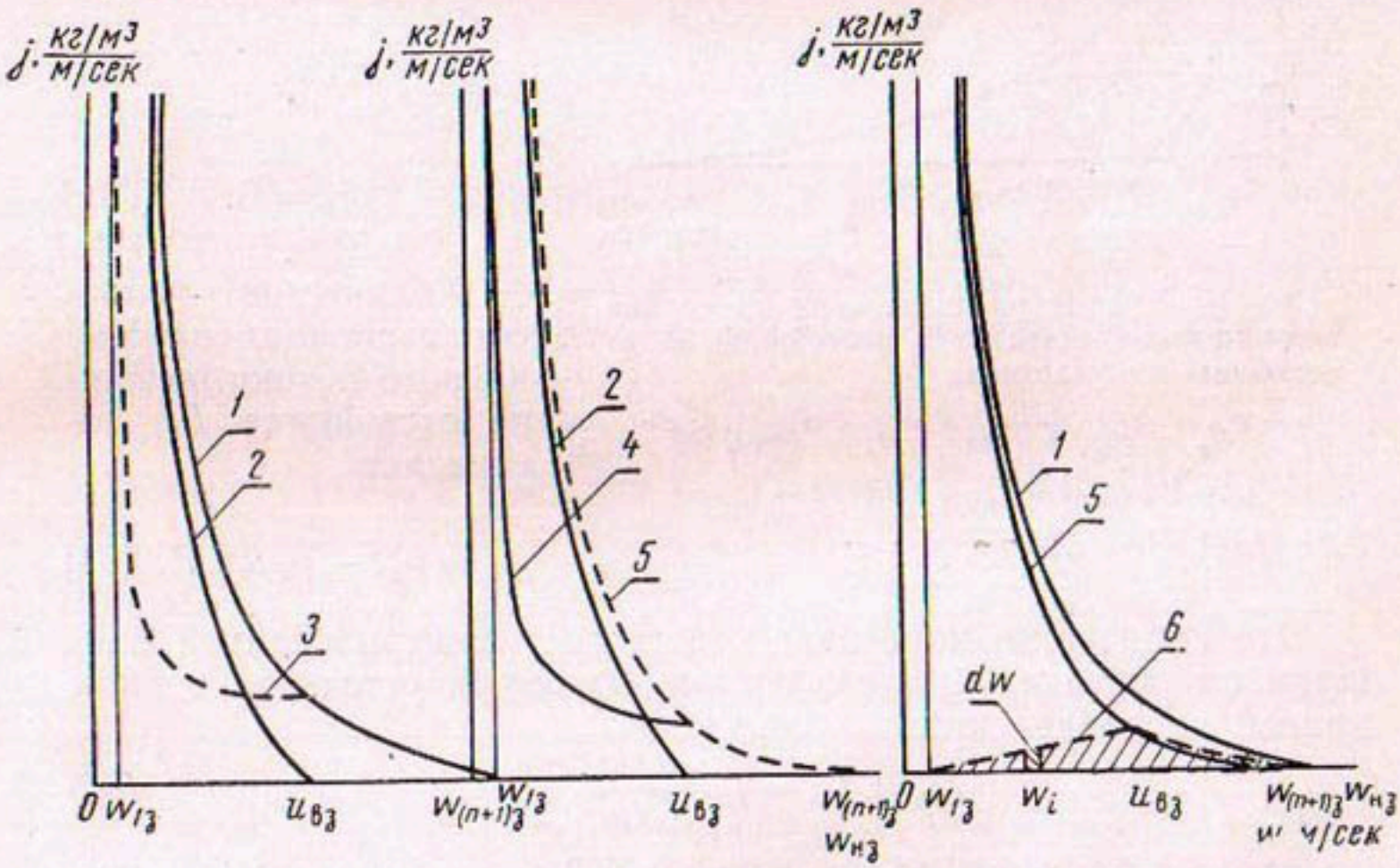


Рис. 15. Кривые распределения по крупности наносов при $w_{(n+1)з} < w_{нз}$:

1 — начальной мутности; *2* — мутности, соответствующей транспортирующей способности потока в отстойнике; *3* — избыточной мутности потока в начале отстойника; *4* — избыточной мутности в отстойнике на расстоянии L_x от начала его; *5* — полной мутности в том же створе отстойника; *6* — осевших в отстойнике наносов.

Далее можно составить уравнение кривой распределения по крупности наносов полной мутности в отстойнике ρ_x. При обозначении ординаты этой кривой j_x можно написать:

$$j_x = j_{тз} + j_{их} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \quad (62)$$

Распределение мутности ρ_x по крупности показано на рисунке 13 в пределах $w_{1з}$—$w_{Нз}$ пунктирной кривой $j_x = f(w)$, а в пределах $w_{Нз}$—$u_{вз}$, где $j_{их} = 0$, кривой распределения $j_{тз} = f(w)$. Здесь $j_x = j_{тз}$.

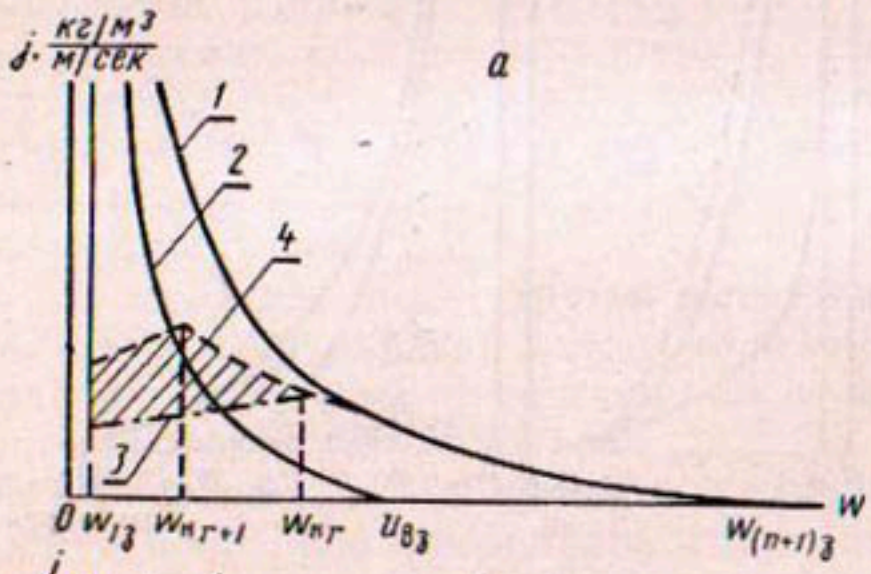


Рис. 16. Кривые распределения по крупности наносов, осевших в отстойнике на отдельных его участках:

$а - w_{Нг} < u_{вз}$; $б - u_{вз} < w_{Нг} < w_{(n+1)з}$;

$1 - j_{0з} = f(w)$; $2 - j_{тз} = f(w)$; $3 - j_{зг} = f(w)$; $4 - j_{зг+1} = f(w)$.

Подставляя в (62) значение $j_{их}$, получают уравнение кривой распределения ρ_x:

в пределах $w_{1з} < w < w_{Нз}$:

$$j_x = j_{0з} - (j_{0з} - j_{тз}) \times \frac{w}{w_{Нз}} \frac{кг/м^3}{м/сек}, \quad (63а)$$

в пределах $w_{Нз} < w < u_{вз}$:

$$j_x = j_{тз} \frac{кг/м^3}{м/сек} \quad (63б)$$

и в пределах $u_{вз} < w < w_{(n+1)з}$:

$$j_x = 0. \quad (63в)$$

Количество наносов, выпавших из 1 $м^3$ водного потока по длине отстойника L_x, составляет:

$$\rho_з = \rho_{0з} - \rho_x \; кг/м^3. \quad (64)$$

Это количество наносов соответствует заштрихованной площади на рисунке 13, а его состав характеризуется уравнением кривой распределения:

$$j_з = j_{0з} - j_x \frac{кг/м^3}{м/сек}. \quad (65)$$

Введя в формулу (65) из формул (63 а—в) значение j_x, получим следующие выражения для построения кривой распределе-

ния по крупности отложившихся в отстойнике наносов. В пределах $w_{1з} < w < w_{Hз}$ изменение $j_з$ происходит линейно.

$$j_з = (j_{0з} - j_{тз}) \frac{w}{w_{Hз}} = (c_{0з} - c_{тз}) \frac{1}{w_{Hз}} + \\ + \left[\frac{c_{тз}}{u_{ьз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \right] \frac{w}{w_{Hз}} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \quad (66а)$$

В пределах $w_{Hз} < w < u_{вз}$ распределение по крупности наносов имеет вид кривой с уравнением:

$$j_з = j_{0з} - j_{тз} = (c_{0з} - c_{тз}) \frac{1}{w} + \left[\frac{c_{тз}}{u_{вз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \right] \frac{кг/м^3}{м/сек}, \quad (66б)$$

а в пределах $u_{вз} < w < w_{(n+1)з}$ наносы распределяются по крупности в соответствии с уравнением начальной мутности, т. е.:

$$j_з = j_{0з} = \frac{c_{0з}}{w} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \quad (66в)$$

Пользуясь уравнениями (63 а — в) и (66 а — в), можно вычислить количество наносов отдельных фракций ρ_x и $\rho_з$.

На участке отстойника протяженностью L_x количество выпавших на дно из 1 $м^3$ воды наносов с гидравлической крупностью от w_i до $w_i + dw$ (рис. 13) можно выразить в виде:

$$d\rho_{зi} = j_{зi} dw.$$

Количество наносов с крупностью в пределах w_i и w_{i+1} будет:

$$\rho_{зi} = \int_{w_i}^{w_{i+1}} j_{зi} dw. \quad (67)$$

Интегрировать выражение (67) можно после подстановки в него значения $j_{зi}$.

Для фракции наносов в пределах $w_{1з} - w_{Hз}$ (рис. 13) значение $j_{зi}$ определяется формулой (66 а). Подставив его в формулу (67), получим:

$$\rho_{зi} = \int_{w_i}^{w_{i+1}} (c_{0з} - c_{тз}) \frac{dw}{w_{Hз}} + \int_{w_i}^{w_{i+1}} \left[\frac{c_{тз}}{u_{вз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \right] \frac{w}{w_{Hз}} dw,$$

откуда:

$$\rho_{зi} = \frac{1}{2w_{Hз}} \left[a_{0з} b_{0з(w_i, w_{i+1})} - a_{тз} b_{тз(w_i, w_{i+1})} \right] кг/м^3, \quad (68)$$

где

$$b_{0з(w_i, w_{i+1})} = (w_{i+1} - w_i)(2w_{(n+1)з} - w_{i+1} - w_i), \quad (69а)$$

$$b_{тз(w_i, w_{i+1})} = (w_{i+1} - w_i)(2u_{вз} - w_{i+1} - w_i). \quad (69б)$$

Для фракции наносов в пределах крупности $w_{Нз}—u_{вз}$ (рис. 13) на основании формул (66 б) и (67):

$$\rho_{зi} = \int_{w_i}^{w_{i+1}} (c_{0з} - c_{тз}) \frac{dw}{w} + \int_{w_i}^{w_{i+1}} \left[\frac{c_{тз}}{u_{вз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \right] dw,$$

откуда:

$$\rho_{зi} = c_{0з} \left(\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{w_{(n+1)з}} \right) - c_{тз} \left(\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{u_{вз}} \right) кг/м^3, \quad (70)$$

что можно записать в виде:

$$\rho_{зi} = \rho_{0з(w_i, w_{i+1})} - \rho_{тз(w_i, w_{i+1})} кг/м^3. \quad (70а)$$

Далее для фракции наносов в интервале крупности $u_{вз} - w_{(n+1)з}$ согласно формулам (66 в) и (67):

$$\rho_{зi} = \int_{w_i}^{w_{i+1}} c_{0з} \frac{dw}{w} - \int_{w_i}^{w_{i+1}} c_{0з} \frac{dw}{w_{(n+1)з}},$$

откуда:

$$\rho_{зi} = c_{0з} \left[\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{w_{(n+1)з}} \right] = \rho_{0з(w_i, w_{i+1})} кг/м^3. \quad (71)$$

Полное количество наносов, отложившихся в отстойнике из 1 $м^3$ воды, получают как сумму (68), (70 а) и (71), заменив в них значения w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{1з}$ и $w_{Нз}$, $w_{Нз}$ и $u_{вз}$ и на $u_{вз}$ и $w_{(n+)з}$.

Произведя указанные замены и суммируя, находят:

$$\rho_{з\,III} = \rho_{0з[w_{Нз}, w_{(n+1)з}]} - \rho_{тз(w_{Нз}, u_{вз})} + \frac{1}{2w_{Нз}} \left[a_{0з} b_{0з(w_{1з}, w_{Нз})} - a_{тз} b_{тз(w_{1з}, w_{Нз})} \right], \quad (72)$$

где

$$b_{0з(w_{1з}, w_{Нз})} = (w_{Нз} - w_{1з})(2w_{(n+1)з} - w_{Нз} - w_{1з}) \quad (73а)$$

и

$$b_{тз(w_{1з}, w_{Нз})} = (w_{Нз} - w_{1з})(2u_{вз} - w_{Нз} - w_{1з}). \quad (73б)$$

2. $u_{вз} < w_{Нз} < w_{(n+1)з}$ — **вторая расчетная область.** Кривые распределения по крупности $\rho_{нх}$, ρ_x и $\rho_з$ для этого случая приведены на рисунке 14. Здесь, в связи с изменением вида кривой распределения избытка наносов в точке $w = u_{вз}$, подвергается изменению и вид остальных кривых.

При значении w в пределах $w_{1з} - u_{вз}$ ординаты кривой распределения по крупности оставшихся во взвешенном состоянии избытка наносов в отстойнике на расстоянии L_x от его начала определяют по формуле (61 а), а при значении w в пределах $u_{вз} - w_{Нз}$

$$j_{нх} = j_{0з} - j_{0з} \frac{w}{w_{Нз}} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (74)$$

В соответствии с этим уравнение кривой распределения наносов полной мутности в отстойнике в створе, расположенном на расстоянии L_x, можно записать при значении w в пределах $w_{1з} - u_{вз}$ по формуле (63 а), в пределах $w_{Нз} - w_{(n+1)з}$ по формуле (63 в), а при значении w в пределах $u_{вз} - w_{Нз}$:

$$j_x = j_{0з} + j_{0з} \frac{w}{w_{Нз}} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (75)$$

Ординаты кривой распределения по крупности отложившихся в отстойнике наносов определяют в пределах $w_{1з} < w < u_{вз}$ по формуле (66 а), в пределах $w_{Нз} < w < w_{(n+1)з}$ по формуле (66 в), а в пределах $u_{вз} < w < w_{Нз}$ они будут равны:

$$j_з = j_{0з} - j_x = j_{0з} \frac{w}{w_{Нз}}$$

или

$$j_з = \frac{c_{0з}}{w_{Нз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} \cdot \frac{w}{w_{Нз}} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (76)$$

Для определения количества отложившихся в отстойнике наносов согласно (67) получаем при значении w в пределах $w_{1з} - u_{вз}$ формулу (68), при $w_{Нз} < w < w_{((n+1)з}$ — формулу (71), а при значении w в пределах $u_{вз} - w_{Нз}$:

$$\rho_{зi} = \frac{1}{2w_{Нз}} a_{0з} b_{0з(w_i, w_{i+1})}. \qquad (77)$$

Выражение для определения полного количества наносов, которые отлагаются в отстойнике (заштрихованная часть площади на рисунке 14), можно получить, если суммировать правые части формул (68), (77) и (71) после замены в них w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{1з}$ и $u_{вз}$, $u_{вз}$ и $w_{Нз}$, $w_{Нз}$ и $w_{(n+1)з}$:

$$\rho_{з\,II} = \rho_{0з\,[w_{Нз}, w_{(n+1)з}]} + \frac{1}{2w_{Нз}} \left[a_{0з} b_{0з(w_{1з}, w_{Нз})} - a_{тз} d_{тз} \right], \qquad (78)$$

где

$$d_{тз} = (u_{вз} - w_{1з})^2. \qquad (79)$$

3. $w_{(n+1)з} < w < w_{Нз}$ — **первая расчетная область.** На небольшом расстоянии от начала, в пределах первой расчетной области, значение $w_{Нз}$ больше $w_{(n+1)з}$ (рис. 15). Для этого случая $j_{их}$,

j_x, $j_з$ и $\rho_{зi}$ определяют соответственно по формулам (61 а), (63 а), (66 а) и (68) при $w_{1з} < w < u_{вз}$ и по (74), (75), (76) и (77) при $u_{вз} < w < w_{(n+1)з}$. Если значение w находится в пределах $w_{(n+1)з}$ и $w_{Hз}$, то ординаты всех перечисленных кривых равны нулю.

Общее количество осевших в отстойнике наносов на этом участке можно выразить (рис. 15) так:

$$\rho_{з_1} = \int_{w_{1з}}^{u_{вз}} (j_{0з} - j_{тз}) \frac{w}{w_{Hз}} dw + \int_{u_{вз}}^{w_{(n+1)з}} j_{0з} \frac{w}{w_{Hз}} dw.$$

Отсюда получается формула:

$$\rho_{з_1} = \frac{1}{2w_{Hз}} (a_{0з} d'_{0з} - a_{тз} d_{тз}), \qquad (80)$$

где дополнительное обозначение $d'_{0з}$ определяется формулой:

$$d'_{0з} = (w_{(n+1)з} - w_{1з})^2. \qquad (81)$$

Приведенный метод позволяет непосредственно рассчитать количество осевших наносов на всем протяжении отстойника длиной L_x.

Полученные расчетные выражения позволяют определить распределение наносов по длине отстойника и их состав.

Количество наносов, отложившихся на некотором участке отстойника, между створками L_r и L_{r+1} можно подсчитать как разность $\rho_{з(r+1)}$ и $\rho_{з,r}$, вычисленных для случаев $w_{H(r+1)} = \frac{v_з H_з}{L_{r+1}}$ и $w_{Hr} = \frac{v_з H_з}{L_r}$, т. е.

$$\rho_{зх} = \rho_{з(r+1)} - \rho_{з.r} \; кг/м^3. \qquad (82)$$

Значение $\rho_{з(r+1)}$ и $\rho_{зr}$ определяют по одной из формул (72), (78) и (80) в зависимости от того, в пределах какой расчетной области расположены створы L_{r+1}, L_r. Например, если участок между этими створами полностью расположен в пределах третьей расчетной области отстойника (рис. 16, *а*), то значения $\rho_{з,r+1}$ и $\rho_{з,r}$ вычисляют по формуле (72). Тогда получают:

$$\rho_{зх111} = \rho_{(зwH(r+1)\, w\, Hr)} - \rho_{тз(\, wH(r+1)\cdot w\, Hr)} - \frac{w_{H,r} - w_{H(r+1)}}{w_{Hr} \cdot w_{H(r+1)}} \times$$

$$\times \left[(c_{0з} - c_{тз}) + \frac{w_{H(r+1)} \cdot w_{Hr} + w_{1з}^2}{2} (a_{тз} - a_{0з}) \right] кг/м^3. \qquad (83)$$

Наносы, которые осаждаются на этом участке, состоят из частиц крупностью в пределах $w_{1з} - w_{Hr}$. Количество их представ-

лено на рисунке 16, *а* заштрихованной площадью, а фракционный состав выражен формулой:

$$\rho_{зx_i} = \rho_{з(r+1)_i} - \rho_{зr_i} \; кг/м^3. \qquad (84)$$

Значение $\rho_{з(r+1)i}$ и $\rho_{зri}$ для фракции крупностью частиц в пределах $w_{1з} - w_{Hr+1}$ определяется по формуле (68) и в пределах w_{Hr} и w_{Hr+1} соответственно формулам (70 а) и (69). После введения этих значений в (84) получаем:
для фракции с крупностью в пределах $w_{1з} - w_{Hr+1}$

$$\rho_{зx_i} = \frac{1}{2}\left[a_{0з} \cdot b_{0з(w_i, w_{i+1})} - a_{тз} b_{тз(w_i, w_{i+1})}\right] \times \left(\frac{1}{wH_{(r+1)}} - \frac{1}{w_{Hr}}\right) кг/м^3 \qquad (85а)$$

и в пределах от $w_{H(r+1)}$ до w_{Hr}

$$\rho_{зx_i} = \rho_{0з(w_i, w_{i+1})} - \rho_{тз(w_i, w_{i+1})} - \frac{1}{2w_{Hr}}\left[a_{0з} \cdot b_{0з(w_i, w_{i+1})} - a_{тз} b_{тз(w_i, w_{i+1})}\right]. \qquad (85б)$$

Таким образом, при помощи формул (83) и (85 а, б) можно определить общее количество и фракционный состав осевших на дно взвешенных наносов на любом участке отстойника в пределах третьей расчетной области его.

Для участка отстойника, расположенного одной частью в пределах второй расчетной области, а другой — в пределах третьей области, значение $\rho_{з(r+1)}$ определяется по формуле (72) и $\rho_{зr}$ — по формуле (78).

Если рассматриваемый участок полностью расположен в пределах второй расчетной области отстойника (рис. 16, *б*), то значения $\rho_{з(r+1)}$ и $\rho_{зr}$ определяют по формуле (78). После подстановки этих значений в (82) и некоторых преобразований

$$\rho_{зx_{II}} = \rho_{0з(w_{H(r+1)}, w_{Hr})} - \frac{w_{Hr} - w_{H(r+1)}}{2w_{Hr} \cdot w_{H(r+1)}}\left[a_{0з}(2w_{(n+1)з} \cdot w_{1з} - w_{H(r+1)} \cdot w_{Hr} - w_{1з}^2) - a_{тз} d'_{тз}\right] кг/м^3. \qquad (86)$$

Количество отдельных фракций наносов, выпавших на этом участке, можно определить для гидравлической крупности частиц в пределах $w_{1з} - u_{вз}$ по формуле (85 а), в пределах $u_{вз} - w_{H(r+1)}$ по формуле:

$$\rho_{зxi} = \left(\frac{1}{w_{H(r+1)}} - \frac{1}{w_{Hr}}\right) a_{0з} b_{0з(w_i, w_{i+1})} кг/м^3, \qquad (87а)$$

а в пределах $w_{H(r+1)} - w_{Hr}$ по формуле:

$$\rho_{зx_i} = \rho_{0з(w_i, w_{i+1})} - \frac{1}{2w_{Hr}} a_{0з} \cdot b_{0з(w_i, w_{i+1})}. \qquad (87б)$$

На более близком к началу отстойника участке последний одной частью может оказаться расположенным в пределах первой, а продолжение его — в пределах второй расчетной области отстойника. В этом случае значение $\rho_{з(r+1)}$ вычисляют по формуле (72), а $\rho_{зr}$ — по формуле (78).

Наконец, при расположении рассматриваемого участка полностью в пределах первой расчетной области значение $\rho_{з(r+1)}$ и $\rho_{зr}$ вычисляют по формуле (80). Для этого случая общее количество осевших наносов составляет:

$$\rho_{з x_1} = \frac{w_{Hr} - w_{H(r+1)}}{2w_{Hr} \cdot w_{H(r+1)}} \left(a_{0з}\, d'_{0з} - a_{тз}\, d'_{тз} \right). \qquad (88)$$

Количество отдельных фракций с крупностью частиц в пределах $w_{iз} - u_{вз}$ определяют по формуле (85а) и в интервале крупности от $u_{вз}$ до $w_{(n+1)з}$ — по формуле (87а).

Значения $\rho_з$, $\rho_{зx}$, $\rho_{зi}$ и $\rho_{зxi}$ выражают количество наносов, которые осаждаются в отстойнике из 1 $м^3$ воды. Поэтому при определении объема заиления отстойника за отдельный период полученные выражения необходимо умножить на

$$A = \frac{86{,}4Qt}{\gamma_н}, \qquad (89)$$

где t — время в сутках, за которое вычисляется объем заиления;

Q — расход воды в отстойнике, $м^3/сек$;

$\gamma_н$ — объемный вес наносов, $т/м^3$.

Если величина $w_{xз}$ по формуле (52) получается больше $w_{1з}$ ($w_{xз} > w_{1з}$), то избыточное количество наносов и отложения в отстойнике будут состоять из частиц с гидравлической крупностью в пределах $w_{xз} - w_{(n+1)з}$. Для этого случая величину $\rho_з$ можно вычислить в зависимости от расчетной области при помощи одной из формул (72, 78, 80), а $\rho_{зx}$ — по (83, 86, 88), заменив в них значение наименьшей гидравлической крупности $w_{1з}$ на $w_{xз}$.

§ 6. Размыв русла и насыщение потока взвешенными и донными наносами

Гидравлический смыв наносных отложений в отстойнике осуществляют резким увеличением скоростей течения воды за счет уменьшения глубин или увеличения расхода воды в нем. При больших скоростях воды мутность поступающего потока значительно меньше, чем то количество наносов, которое поток способен транспортировать во взвешенном состоянии и по дну.

Обычно поток, поступающий в отстойник, освобождается от донных наносов при помощи струенаправляющих систем, наносоперехватывающих галерей и др. Удаление донных наносов нарушает равновесие между живой силой потока и сопротивлением русла. При наличии этих наносов русло находится под их защитой и размыва его не происходит. Поэтому в потоке должно находиться определенное количество донных наносов.

При осаждении наносов в отстойнике донные отложения образуются за счет взвешенных наносов, а при отсутствии последних за счет наносов при размыве русла.

Ниже подпорных сооружений часто наблюдается размыв русла, что также объясняется нарушением баланса донных наносов. В результате отложения наиболее крупных частиц в верхнем бьефе или перемешивания потока в нижнем бьефе в условиях бурного течения движение донных наносов здесь отсутствует. Поэтому русло в нижнем бьефе развивается на протяжении, достаточном для того, чтобы осаждающиеся крупные частицы взвешенных наносов и наносов размыва русла образовали у дна расход наносов, соответствующий транспортирующей способности потока для этих наносов.

То же явление наблюдается, например, на головных участках магистральных каналов при бесплотинном водозаборе в связи с применением на них струенаправляющих систем, не допускающих донные наносы. Здесь, несмотря на избыток в потоке взвешенных наносов, обычно происходит размыв русла канала на начальном участке.

При промывках отсутствие донных наносов также способствует интенсивному размыву русла, но продукты размыва не полностью насыщают поток донными наносами. Вымываемые частицы поднимаются в верхние слои восходящими скоростями потока, насыщая его взвешенными наносами. Процесс размыва продолжается до предельного насыщения потока взвешенными и донными наносами. Степень насыщения потока и длина участка, на котором поток достигает предельного насыщения, зависят не только от гидравлических элементов потока и его начальной мутности, но и от состава отложившихся в отстойнике наносов.

Если при промывке обозначить транспортирующую способность потока в отношении донных наносов через $\rho_{дп}$, а взвешенных — $\rho_{тп}$, то полное количество наносов $\rho_{т(в.д)}$, которое в состоянии транспортировать данный поток при насыщении его всеми крупностями частиц, составит:

$$\rho_{т(в.д)} = \rho_{тп} + \rho_{дп}. \qquad (90)$$

В составе взвешенных наносов $\rho_{тп}$ наибольшая частица имеет гидравлическую крупность w, равную вертикальной

составляющей пульсационной скорости $u_{вп}$ ($w = u_{вп}$). Значение $u_{вп}$ определяется по формуле, аналогичной (54):

$$u_{вп} = 0{,}065\,(v_п - 0{,}05)\,i_п^{1/4}\ м/сек. \qquad (91)$$

Следует заметить, что в потоке имеются вертикальные скорости значительно более $u_{вп}$, но объемы жидкости, перемещающиеся с такими скоростями, сравнительно малы и не обеспечивают постоянного поддержания во взвешенном состоянии крупных частиц наносов [23]. Эти пульсационные скорости, находясь преимущественно в нижних слоях потока, оказывают воздействие на движение донных наносов, которые периодически взвешиваются ими. Поэтому в составе донных наносов встречаются частицы значительно крупнее частиц взвешенных наносов. Если обозначить наибольшую крупность частиц донных наносов через $u_{дп}$, то на основании изложенного выше можно считать, что $u_{дп} > u_{вп}$.

Как уже говорилось, уравнение (90) определяет полное количество наносов, которое может быть транспортировано потоком в донном и взвешенном состоянии при насыщении его частицами всех крупностей. Но отложения в отстойнике состоят преимущественно из более крупных наносов. Вследствие этого обычно не происходит насыщения потока мелкими наносами до его транспортирующей способности. Кроме того, на степени насыщения потока сказывается количество и состав наносов, поступающих при промыве.

Если обозначить количество наносов, которое добавляется в 1 $м^3$ воды при промывке отстойника $\rho_п$, а начальную мутность потока через $\rho_{оп}$, то максимальное значение $\rho_п$ определяется уравнением:

$$\rho_п = \rho_{г(в,д)} - \rho_{0п} = \rho_{тп} + \rho_{дп} - \rho_{0п}. \qquad (92)$$

Однако ввиду малого содержания мелких наносов в донных отложениях действительное количество размыва при промыве будет меньше $\rho_п$.

Наносные отложения характеризуются составом с наибольшей гидравлической крупностью частиц $w_{(n+1)з}$, а поток при промывке поступает в отстойник с мутностью $\rho_{оп}$ и наибольшей крупностью частиц $w_{(n+1)п}$. По заданным гидравлическим элементам потока, последний в состоянии транспортировать взвешенные наносы с наибольшей гидравлической крупностью, равной взвешивающей скорости потока в отстойнике при промыве $u_{вп}$ (91), и донные наносы с гидравлической крупностью частиц до $u_{дп}$. Степень насыщения потока наносами при промыве зависит от значений перечисленных величин.

Наиболее эффективны гидравлические очистки отстойников, когда транспортирующая способность потока значительно превышает начальную мутность $\rho_{оп}$, а поток транспортирует части-

цы с крупностью, превышающей крупности $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$. Если таких условий нет, производительность гидравлических промывок резко снижается.

Ниже рассмотрены три характерных режима промыва отстойника:

1) наибольшая гидравлическая крупность частиц наносных отложений $w_{(n+1)з}$ или начальной мутности при промыве $w_{(n+1)п}$ больше, чем для частиц с $w=u_{дп}$, которые поток при промыве транспортирует в донном состоянии;

2) значения $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$ находятся в пределах между наибольшими крупностями частиц, которые поток при промыве может транспортировать во взвешенном и донном состоянии, т. е. $u_{вп}<w_{(n+1)з}<u_{дп}$ и $u_{вп}<w_{(n+1)п}<u_{дп}$;

3) наибольшие гидравлические крупности частиц наносов начальной мутности при отстаивании $w_{(n+1)з}$ и при промыве $w_{(n+1)п}$ меньше наибольшей крупности частиц $u_{вп}$, которые поток при промыве транспортирует во взвешенном состоянии ($w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}<u_{вп}$).

Предполагается, что скорости потока при промыве отстойника настолько велики, что наносы размываются послойно без сепарирования частиц, а значение транспортирующей способности потока в отношении взвешенных и донных наносов $\rho_п$ во всех случаях превышает начальную мутность $\rho_{оп}$.

При $w_{(n+1)п}>u_{дп}>u_{вп}$ исключается возможность полного смыва наносных отложений из отстойника. В этом случае поток не в состоянии транспортировать все наносы начальной мутности, и избыток их осаждается. Но поскольку в начале отстойника донные наносы отсутствуют, на некотором протяжении русло может размываться и частично насыщать поток донными наносами. Насыщение потока другой частью донных наносов в этих условиях происходит за счет осаждающихся крупных частиц взвешенных наносов. Через некоторое время дно покроется крупными частицами (отмостка дна), а затем будет занесено. Занесение русла наблюдается на участке отстойника протяженностью

$$L_з=\frac{q_п}{w_{хп}}, \tag{93}$$

где $w_{хп}$ — наименьшая гидравлическая крупность избытка наносов начальной мутности при промыве отстойника, значение которой определяется по методу, изложенному в § 11.

Таким образом, размыв отстойника будет наблюдаться только на участке ниже этого створа, где отложения состоят из более мелких наносов. Гидравлические промывки в таких условиях могут оказаться нецелесообразными из-за малой производительности.

Во втором случае ($u_{вп} < w_{(n+1)з} < u_{дп}$ и $u_{вп} < w_{(n+1)п} < u_{дп}$) поток не может транспортировать во взвешенном состоянии некоторое количество крупных частиц наносов из начальной мутности или из продукта размыва донных отложений. Эти наносы составляют избыточную мутность и осаждаются, образуя донные наносы. Если избыток начальной мутности меньше количества наносов, которое при промыве поток может транспортировать в донном состоянии, то промыв наносных отложений будет обеспечен.

Такие условия часто встречаются на практике. Например, при промывах отстойника на канале Куль-Арык в 1941 г., несмотря на большой смыв наносных отложений, частицы с диаметром крупнее 0,1 *мм*, содержащиеся в начальной мутности, опускались в нижние слои потока и транспортировались в придонном слое [23]. То же происходило при промывах наносных отложений в крупномасштабной модели отстойника на головном участке Каракумского канала в 1958 г. [21].

Наибольшей производительности можно ожидать при промыве отстойников с большими скоростями течения воды и взвешивающей скоростью $u_{вп}$. При условии $u_{вп} > w_{(n+1)з}$ или $w_{(n+1)п}$ можно обеспечить размыв всех отложившихся в отстойнике наносов. Здесь поток насыщается большим количеством мелких наносов и вес размытых наносов, приходящийся на 1 $м^3$ воды, близок к определяемому по формуле (92) количеству наносов.

Если вес наносов, который в действительности смывается одним кубическим метром водного потока, обозначить через $\rho_{пф}$, а способность промывного потока дополнительно транспортировать наносы при промывке при насыщении его всеми крупностями частиц — через $\rho_п$ (92), то коэффициент k определит степень производительности гидравлического способа очистки.

$$k = \frac{\rho_п}{\rho_{пф}}. \qquad (94)$$

Как указано выше, для промыва заданного состава наносных отложений наибольшее значение k будет при $u_{вп} > w_{(n+1)з}$ и $u_{вп} > w_{(n+1)п}$.

§ 7. Расход и состав донных наносов

Транспортирование потоком донных наносов, состоящих из наиболее крупных частиц, несмотря на их относительно малое количество по сравнению с взвешенными, существенно увеличивает производительность гидравлического способа очистки. Это влияние особенно велико в условиях, когда крупные частицы наносных отложений при их размыве не транспортируются

потоком во взвешенном состоянии. В этом случае продукт размыва русла распределяется таким образом, что наиболее крупные частицы насыщают поток донными и придонными наносами, а остальные — мелкие частицы — взвешиваются потоком.

Правильное определение количества наносов, которое поток транспортирует в донном и придонном состоянии, имеет существенное значение при расчете производительности промывов.

Существует ряд методов расчета транспорта донных наносов, основанных на известных теоретических предпосылках или эмпирических зависимостях. Ниже приведены некоторые из формул расчета донных наносов, наиболее часто встречающихся в литературе.

Следует заметить, что все формулы выведены по материалам исследований для песчаных грунтов среднего и крупного состава.

В. Н. Гончаров [10] предлагал зависимость для расчета твердого расхода на 1 *м* ширины русла:

$$q_т = 2{,}0\left(\frac{v}{v_H}\right)^3\left(\frac{d}{H}\right)^{0.1} d\,(v - v_H)\ кг/сек, \qquad (95)$$

где

$$v_H = 3R^{0.2}\sqrt{d + 0{,}0014^{0.6}}. \qquad (96)$$

В последнее время В. Н. Гончаров [11] предложил зависимость в ином виде:

$$q_т = \frac{\gamma_1(1+\varphi)}{500} v_H d\left(\frac{v^2}{v_H^3} - 1\right)\left(\frac{v}{v_H} - 1\right) кг/сек, \qquad (97)$$

а уравнение донной мутности при $\gamma_1 = 2650\ кг/м^3$ в форме:

$$\rho_д = 5{,}3\,(1+\varphi)\,\frac{d}{H}\left(\frac{v^3}{v_H^3} - 1\right)\left(1 - \frac{v_H}{v}\right) кг/м^3. \qquad (98)$$

В формулах (97, 98), где учитывается также некоторая часть взвешенных наносов, значение v_H составляет:

$$v_H = \sqrt{\frac{2g\,(\gamma_1 - \gamma)\,d}{3{,}5\gamma}} \cdot \lg\frac{8{,}8R}{d_k}. \qquad (99)$$

Г. И. Шамов [28] для определения расхода донных наносов предложил формулу:

$$q_т = 0{,}95\sqrt{d}\left(\frac{v}{v_H}\right)^3 (v - v_H)\left(\frac{d}{H}\right)^{0{,}25} кг/сек\,м, \qquad (100)$$

где

$$v_H = 3{,}83 d^{1/3} R^{1/6}. \qquad (101)$$

На основании анализа имеющихся материалов исследований И. И. Леви [15] рекомендовал формулу:

$$q_т = 2\left(\frac{v}{\sqrt{gd}}\right)^3 d\,(v - v_н)\left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} кг/сек \cdot м, \qquad (102)$$

где для мелких наносов

$$v_н = 1{,}4\sqrt{gd}\,\lg\frac{12R}{d_k}. \qquad (103)$$

Зависимости (102) и (103) распространяются на потоки с относительной шероховатостью $\frac{d}{H} > \frac{1}{5000}$ при $d > 0{,}5$—$1{,}0$ *мм*.

А. Ш. Барекян [6] на основании своих исследований, проведенных в гидротехнической лаборатории ВНИИГиМ, и анализа других существующих материалов предложил формулу для вычисления расхода донных наносов:

$$q_т = \delta v^3\left(\frac{v}{v_н} - 1\right) кг/сек \cdot м, \qquad (104)$$

где

$$v_н = 0{,}072\sqrt{1400d + 0{,}005\,(H + 10)}\,\lg\frac{12{,}3R}{d} \qquad (105)$$

и

$$\delta = 0{,}23\lg(5v).$$

В перечисленных формулах приняты следующие обозначения:

$v_н$ — несдвигающая или непередвигающая скорость потока;
v — средняя скорость течения воды;
H — глубина потока;
γ_1 — удельный вес наносов;
γ — удельный вес воды;
d — средний диаметр частиц грунта;
$d_к$ — диаметр крупных частиц грунта, содержание которых равно 5%;
g — ускорение силы тяжести;
φ — параметр турбулентности поведения зерен грунтов:
для $d > 1{,}5$ *мм* $\varphi = 1{,}0$;
для $0{,}15 < d < 1{,}5$ *мм*

$$\varphi = \frac{1}{\beta}\sqrt{\frac{\rho\mu}{\gamma_1 - \gamma}}\sqrt{\frac{2g}{1{,}75\gamma d}}; \qquad (106)$$

в ламинарной области при $d < 0{,}15$ *мм*

$$\varphi = \frac{33{,}8}{\sqrt{1{,}75\,(\gamma_1 - \gamma)\,d^3}}. \qquad (107)$$

Вообще значение $\varphi = \frac{w_c}{w}$, где w — гидравлическая крупность частиц, а w_c — стандартная скорость определяется по формуле:

$$w_c = \sqrt{\frac{2g(\gamma_1 - \gamma)d}{1{,}75\gamma}}. \qquad (108)$$

Значения w и φ, вычисленные В. Н. Гончаровым, приведены в его книге [11].

В таблице 13 приведены вычисленные значения расхода донных наносов по перечисленным формулам для потоков с гидравлическими элементами при промывах крупномасштабной модели отстойника Каракумского канала [21] и Куль-Арыкского отстойника.

Модель Каракумского отстойника прямоугольного сечения шириной 2,5 *м* и длиной 250 *м* выполнена из бетона. Куль-Арыкский отстойник — земляной, имеет длину 2,5 *км* и ширину 30—40 *м*.

Как видно из таблицы, результаты расчета по этим формулам весьма различны.

Одной из причин большого количества формул по определению расхода донных наносов и значительного расхождения результатов расчета по ним можно считать применение в расчетах среднего значения диаметра частиц донных наносов. Как было показано раньше [23], средний диаметр или средняя гидравлическая крупность частиц наносов далеко не полностью характеризует состав наносов, и эти значения в зависимости от числа фракций и методов вычисления могут получиться совершенно различными для одного и того же состава грунта. Кроме того, поток оказывает воздействие на отдельные частицы наносов, имеющие отличные от среднего диаметра крупности. Очевидно, что передвижение наносов при размыве начинается с мелких частиц, слагающих русло и имеющих в десятки раз меньшую крупность, чем средние частицы.

Так как поток воды воздействует на каждую частицу донных и придонных наносов разнородного состава, то при подборе структуры формулы по определению количества этих наносов необходимо наиболее полно учитывать состав наносов, исключив из них средние значения диаметра или гидравлической крупности.

В данной работе представляет интерес движение донных и придонных наносов, которые состоят в основном из мелкого и среднего песка. Такие частицы передвигаются преимущественно во взвешенном состоянии и главным образом под воздействием различных пульсационных скоростей. Вследствие этого можно считать, что наиболее полное использование энергии пульсационных скоростей потока на транспортирование донных

ТАБЛИЦА 13

Значение расхода донных наносов, *кг/секм*

Объект исследований	Дата исследований	v, *м/сек*	H, *м*	Значение $q_т$, вычисленное по формуле *кг/секм*			
				Шамова	Гончарова	Леви	Барекяна
Модель отстойника Каракумского канала	19/V 1958 г.	0,79	0,38	0,115	1,76	0,302	0,348
	27/V 1958 г.	0,83	0,50	0,162	2,01	0,366	0,456
	9/VI 1958 г.	0,86	0,50	0,187	2,32	0,422	0,542
	5/VII 1958 г.	0,99	0,47	0,351	4,21	0,775	1,150
	14/VII 1958 г.	0,87	0,31	0,268	2,82	0,505	0,475
	24/VII 1958 г.	1,05	0,24	0,690	6,66	1,180	1,500
Отстойник на канале Куль-Арык	23/V 1946 г.	1,33	0,59	0,852	13,2	14,6	4,09
	10/VI 1946 г.	1,32	0,68	0,736	9,15	14,1	3,87
	19/VII 1946 г.	1,20	1,5	0,243	9,75	10,3	2,28
	6—16/X 1946 г.	0,70	1,6	0,023	0,694	1,08	0,165
Аму-Дарья		1,70	4,0	0,369	21,1	44,0	10,8

Примечание. При вычислениях приняты средние значения диаметра частиц $d=0{,}0005$ и $d_к=0{,}00025$ *м*.

и придонных наносов бывает при условии, если эти наносы имеют различные крупности, а характер распределения их по гидравлической крупности w аналогичен с распределением частоты повторения по размерам вертикальных скоростей потока u.

Исследования состава взвешенных наносов рек и распределения частоты повторения пульсационных вертикальных скоростей в потоке по их величине показали, что распределение по крупности насыщающих поток взвешенных наносов может быть принято по кривой:

$$j_т = \frac{c_т}{w} - \frac{c_т}{u_в}, \qquad (109)$$

где $j_т$ — ордината кривой распределения взвешенных наносов, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$;

$c_т$ — постоянная кривой распределения по крупности наносов, *кг/м*^{3}, зависит от гидравлических элементов потока: $c_т = 200\, u_в$;

$u_в$ — наибольшая гидравлическая крупность частиц взвешенных наносов, *м/сек*, значение которой также зависит от гидравлических элементов потока и определяется по формуле (10);

w — гидравлическая крупность частиц наносов, для которых определяется ордината $j_т$, *м/сек*.

С известным приближением и для удобства расчетов можно принять аналогичную закономерность в распределении по крупности донных и придонных наносов:

$$j_д = \frac{c_д}{w} - \frac{c_д}{u_д}\ \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (110)$$

Обычно речные потоки не насыщаются мелкими частицами взвешенных наносов. Вследствие этого все мелкие частицы устойчиво транспортируются во взвешенном состоянии и в составе донных наносов их почти нет. То же наблюдается в составе наносов при гидравлическом способе очистки. Поэтому для указанных условий ординату распределения донных и придонных наносов в области мелких частиц (в пределах от w_{min} до $u_в$) можно принять постоянной, равной:

$$j_д = c_д \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)\frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (111)$$

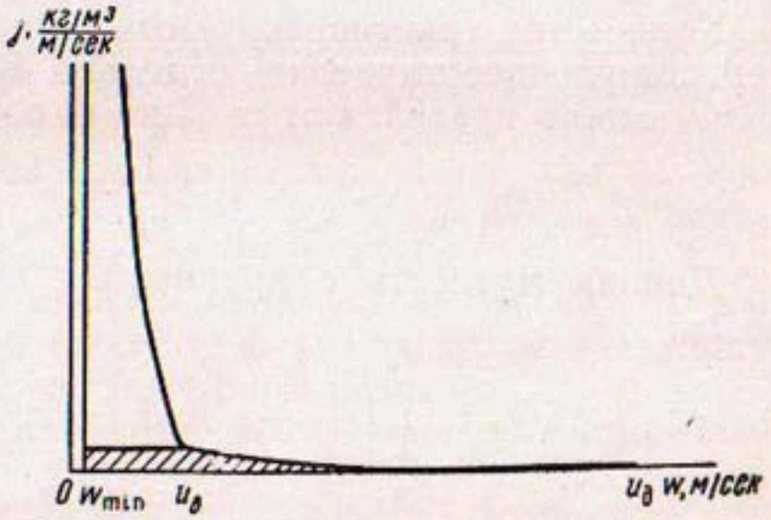


Рис. 17. Кривая распределения по крупности взвешенных и донных наносов, транспортируемых потоком.

Условие (111) позволяет значительно облегчить расчеты по вычислению расхода донных и придонных наносов.

Полное количество наносов, которое может транспортировать поток в донном, придонном и взвешенном состоянии, и их распределение по крупности можно представить в виде графика (рис. 17).

На рисунке 17 нижняя заштрихованная площадь соответствует количеству и распределению по крупности донных и придонных наносов; верхняя же площадь, заключенная между ординатой (при $w = w_{min\,в}$) и кривой, соответствует количеству и распределению по крупности наносов, устойчиво транспортируемых потоком во взвешенном состоянии.

Если ординату кривой распределения по крупности полного количества транспортируемых потоком наносов обозначить через $j_{т(в.д)}$, то ее значение в пределах крупности $w_{min} - u_в$ будет:

$$j_{т(в.д)} = j_т + j_д \qquad (112а)$$

и в пределах крупностей от $u_в$ до $u_д$, где $j_т = 0$,

$$j_{т\,(в.д)} = j_д. \qquad (112б)$$

Подставляя значения $j_т$ и $j_д$ из формул (109) и (111) в формулу (112а) и значение $j_д$ из (110) в (112б), получим значение $j_{т(в,д)}$ в пределах крупностей до $u_в$:

$$j_{т(в.д)} = \frac{c_т}{w} - \frac{c_т - c_д}{u_в} - \frac{c_д}{u_д} \frac{кг/м^3}{м/сек}, \qquad (113а)$$

а в пределах от $u_в$ до $u_д$:

$$j_{т(в.д)} = \frac{c_д}{w} - \frac{c_д}{u_д} \frac{кг/м^3}{м/сек}. \qquad (113б)$$

Количество транспортируемых потоком донных и придонных наносов удобнее вычислять отдельно. Как видно из рисунка, это количество в пределах от w_{min} до $u_в$ составляет:

$$\rho_{д(w_{min\,д},\, u_в)} = c_д \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)(u_в - w_{min\,д}). \qquad (а)$$

Донная мутность с крупностью частиц в пределах от $u_в$ до $u_д$:

$$\rho_{д\,(u_в,\, u_д)} = c_д \int_{u_в}^{u_д} \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_д}\right) dw = c_д \left(\ln \frac{u_д}{u_в} - \frac{u_д - u_в}{u_д}\right). \qquad (б)$$

Суммируя два последних выражения, получаем уравнение для определения полного количества донных и придонных наносов:

$$\rho_д = c_д \left(\ln \frac{u_д}{u_в} - \frac{u_д - u_в}{u_д}\right) + c_д \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)(u_в - w_{min\,д}), \qquad (114)$$

которое после преобразования можно записать в следующем виде:

$$\rho_д = c_д \left[\ln \frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right) w_{min\,д}\right] кг/м^3. \qquad (115)$$

Транспортирующая способность потока в отношении взвешенных наносов составляет:

$$\rho_т = c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_{min\,в}} - \frac{u_в - w_{min\,в}}{u_в}\right) кг/м^3. \qquad (116)$$

Сумма (115) и (116) дает величину полной мутности (взвешенной и донной), соответствующей транспортирующей способности потока:

$$\rho_{т(в.д)} = \rho_т + \rho_д = c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_{min\,в}} - \frac{u_в - w_{min\,в}}{u_в}\right) + c_д \left[\ln \frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right) w_{min\,д}\right] кг/м^3. \qquad (117)$$

На рисунке 17 значения наименьших гидравлических крупностей для донных и взвешенных наносов $w_{min\,д}$ и $w_{min\,в}$ приня-

ты одинаковыми и обозначены $w_{\min}$. В действительности они могут иметь разные значения.

Наличие равенства между $w_{\min в}$ и $w_{\min д}$ имеет место при полном насыщении или перенасыщении потока частицами наносов с гидравлической крупностью $w_{\min в}$, т. е. при содержании в избыточной мутности частиц наносов с гидравлической крупностью $w_{\min в}$. Как уже говорилось, поток воды в реках обычно не насыщен взвешенными наносами, особенно с мелкими частицами. В составе донных наносов мелкие частицы отсутствуют ($w_{\min д} > w_{\min в}$).

Поступая из реки в каналы, поток уменьшает транспортирующую способность, и в нем образуется избыток взвешенных наносов. Тогда придонный слой воды насыщается мелкими частицами, которые осаждаются из верхних слоев. Наименьшая крупность донных наносов составляет $w_{\min д} = w_x$, где w_x — наименьшая гидравлическая крупность частиц избытка взвешенных наносов, определяемая по формуле (12).

Если же в потоке нет избытка взвешенных наносов, то донные наносы образуются из продукта размыва русла, и их состав определяется размерами частиц грунта дна.

Что касается наибольшей гидравлической крупности частиц $u_д$, то ее значение, как и значение $u_в$, зависит от гидравлических элементов потока и, очевидно, значительно больше, чем $u_в$ ($u_д > u_в$).

§ 8. Наибольшая крупность частиц донных наносов

Количество донных и придонных наносов, транспортируемых потоком, определяется по формуле (115).

В этой формуле неизвестны значения наибольшей гидравлической крупности передвигаемых по дну наносов $u_д$, наименьшей гидравлической крупности частиц, присутствующих в составе донных и придонных наносов $w_{\min д}$, и величина постоянной кривой распределения по крупности донных наносов $c_д$.

Для определения наибольшей гидравлической крупности частиц донных наносов могут быть использованы данные исследований размывающих скоростей потока.

А чтобы определить величину размывающей скорости потока или скорости, соответствующей началу движения донных наносов u_0, на основании обширных исследований был разработан ряд формул.

М. А. Великанов [8], по данным лабораторных исследований с наносами диаметром от 0,1—0,25 до 4,0—5,0 *мм*, предложил

для определения предельных размывающих скоростей следующую зависимость:

$$u_0 = 3{,}14\sqrt{15d + 0{,}006}\ м/сек. \qquad (118)$$

Как выяснилось впоследствии, на величину размывающей скорости влияет и глубина потока, что не учтено в формуле М. А. Великанова.

В. Н. Гончаров, И. И. Леви и другие авторы при определении размывающих скоростей учитывали влияние глубины потока. Вывод этих зависимостей произведен с учетом величины лобового и подъемного усилий, действующих на лежащие на дне частицы наносов, а для определения отдельных параметров, входящих в указанные зависимости, использован материал дополнительных исследований с песчаными наносами.

В частности, В. Н. Гончаров [11] предложил формулу:

$$u_0 = \left(\lg \frac{8{,}8R}{d_к}\right)\sqrt{\frac{2g(\gamma_1 - \gamma)}{1{,}75}d}\quad м/сек. \qquad (119)$$

Формула И. И. Леви [15] для песчаных наносов имеет вид:

$$u_0 = 1{,}4\sqrt{gd}\ \lg \frac{12R}{d_к}\ м/сек\ \left(при\ \frac{R}{d_к} > 60\right) \qquad (120а)$$

и

$$u_0 = 1{,}3\sqrt{gd}\left(0{,}8 + \frac{2}{3}\lg\frac{10R}{d_к}\right) м/сек\ \left(при\ 10 < \frac{R}{d_к} < 40\right). \qquad (120б)$$

Формулу (120а) автор считает возможным распространить для условий $\frac{d}{h}$ до $\frac{1}{5000}$ при диаметре частиц $d = 0{,}5 - 1{,}0$ *мм*.

И. И. Леви проанализировал также имеющиеся материалы для мелкозернистых частиц и предложил формулы по определению размывающих скоростей для гладкого русла с ламинарным режимом течения потока и для условий переходной области, в которых степень влияния размера частиц на величину размывающих скоростей уменьшается с уменьшением диаметра. Для переходной области эта формула имеет вид:

$$u_0 = 35d^{0{,}25}\left(\lg \frac{7{,}5R}{d} - 6d\right). \qquad (121)$$

Представляет также интерес формула для определения размывающей скорости песчаных наносов, предложенная Г. И. Шамовым [27]:

$$u_0 = 4{,}6d^{1/3}R^{1/6}. \qquad (122)$$

Уменьшение влияния крупности частиц на величину размывающей скорости с уменьшением диаметра учитывается также в работах Ша-Юй-чин и А. Ш. Барекяна. Ша-Юй-чин учитывает

это влияние путем включения в формулу величины гидравлической крупности частиц, закономерность изменения которой меняется в зависимости от режима осаждения наносов (турбулентный, ламинарный или переходный). Эта формула, приведенная в работе А. Ш. Барекяна [7], имеет вид:

$$u_0 = 37{,}7\frac{d^{3/4}}{w^{1/2}}. \qquad (123)$$

А. Ш. Барекян дает следующие формулы:
для $0{,}0001 \leqslant d \leqslant 0{,}00025$ *м*

$$u_0 = 0{,}31\sqrt[5]{d}\,\lg\frac{12{,}3R}{d}, \qquad (124а)$$

для $0{,}00025 \leqslant d \leqslant 0{,}0015$ *м*

$$u_0 = 3{,}55\sqrt{d}\,\lg\frac{12{,}3R}{d}, \qquad (124б)$$

для $d > 0{,}0015$ *м*

$$u_0 = 17{,}7\sqrt[4]{d^3}\,\lg\frac{12{,}3R}{d}. \qquad (124в)$$

В перечисленных формулах (120, 122—124а—б) приняты следующие обозначения:

u_0 — скорость потока, соответствующая началу размыва, *м/сек*;
d — средний диаметр частиц наносов, *м*;
$d_к$ — диаметр, соответствующий 90% содержанию частиц по кривой распределения наносов по крупности, *м*;
R — гидравлический радиус потока, *м*;
w — гидравлическая крупность частиц наносов, *м/сек*.

В формуле (121) размеры R и d приняты в *см*, а скорость u_0 — в *см/сек*.

Для сравнения в таблице 14 и на рисунке 18 приведены данные, характеризующие изменение скоростей в зависимости от диаметра частиц наносов однородного состава, вычисленные по вышеприведенным формулам, при гидравлическом радиусе потока $R = 1{,}0$ *м*.

Особенно большие расхождения получились в значениях скоростей, рассчитанных по формулам Барекяна и Ша-Юй-чин. Наиболее близки между собой результаты, вычисленные по формулам В. Н. Гончарова и И. И. Леви.

Формула М. А. Великанова для крупных частиц дает несколько преувеличенный результат, а формула Г. И. Шамова — преуменьшенный.

Анализируя имеющиеся данные, считаем, что при расчетах удобнее пользоваться формулой В. Н. Гончарова, что мы и де-

лаем в настоящей работе. Как видно из кривых изменений $u_0=f(d)$ (рис. 18), более существенное расхождение в значениях u_0, подсчитанных по формулам И. И. Леви, и В. Н. Гончарова, получается при малом диаметре частиц — для области гидравлически гладкого русла. Это расхождение в условиях переходной области для частиц диаметром 0,25—1,5 *мм* уменьшается, а для

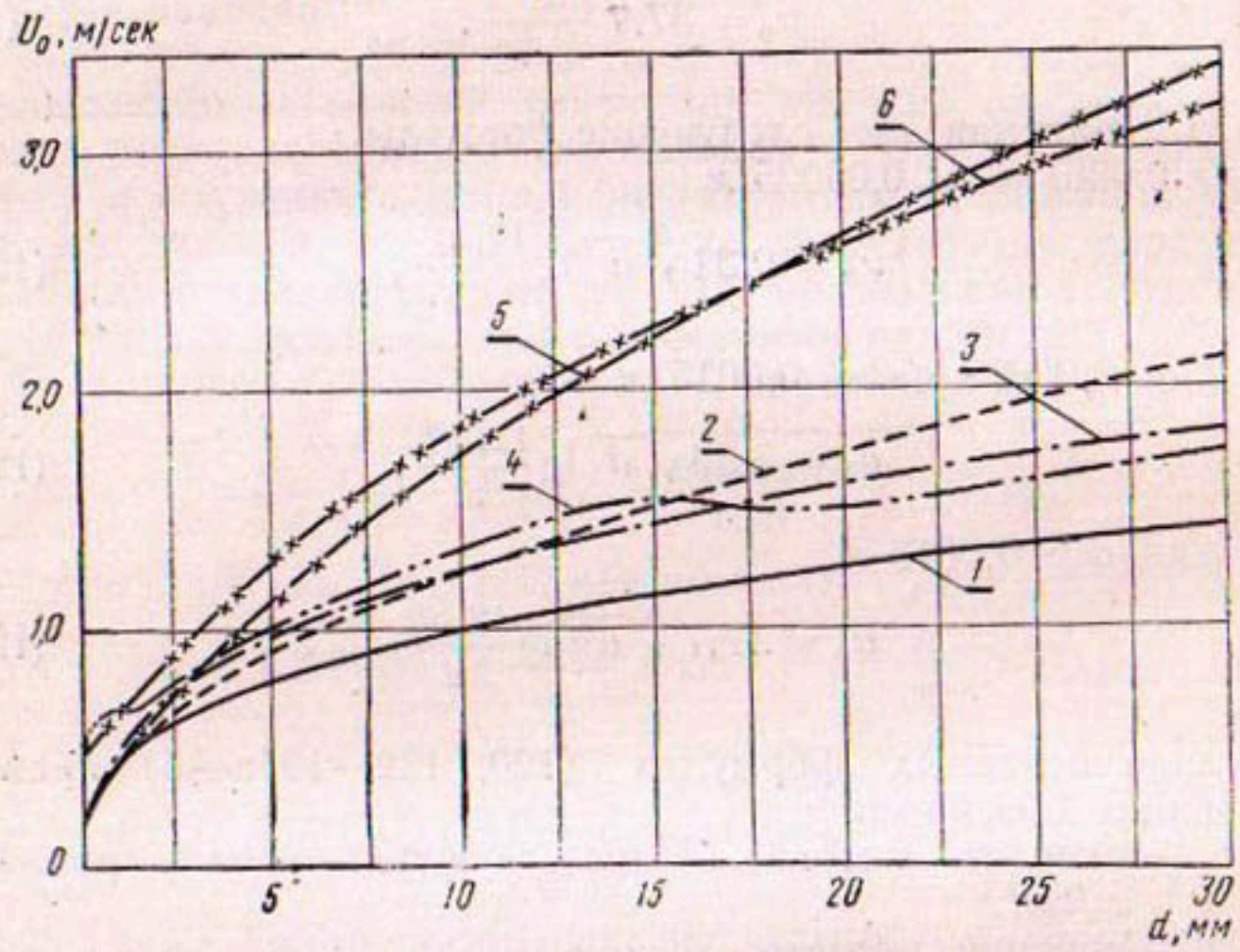


Рис. 18. Кривые зависимости $u_0=f(d)$, построенные по формулам:
1 — Г. И. Шамова; *2* — М. А. Великанова; *3* — В. Н. Гончарова; *4* — И. И. Леви; *5* — А. Ш. Барекяна; *6* — Ша-Юй-чин.

более крупных частиц разница в скоростях составляет небольшую величину.

Следует учесть, что формулы по определению предельных скоростей размыва основаны на экспериментальных данных с относительно крупными частицами. Поэтому для мелких наносов они не дают надежных результатов. Но в расчетах гидравлического смыва наносных отложений обычно имеют дело со скоростями течения, при которых обеспечиваются условия устойчивой турбулентности. Из таблицы 14 и рисунка 18 видно, что величина предельной размывающей скорости для частиц диаметром 1,5 *мм* находится в пределах 0,55—0,60 *м/сек*. При гидравлическом же смыве наносных отложений из отстойников скорости бывают значительно больше. Поэтому можно считать, что наибольшая крупность частиц наносов, которые поток при гидравлических промывах в состоянии перемещать, имеет диаметр больше 1,5 *мм*.

ТАБЛИЦА 14

Данные о размывающих скоростях потока, *м/сек*

Диаметр частиц d, *м*	Гидравлическая крупность частиц w при t=15°, *м/сек*	Размывающая скорость u_0 по формулам					
		Шамова	Великанова	Гончарова	Леви	Барекяна	Ша-Юй-чин
0,00005	0,00197	0,169	0,258	0,158	0,545	0,231	0,505
0,0001	0,00588	0,213	0,272	0,209	0,545	0,250	0,492
0,00025	0,0244	0,289	0,310	0,305	0,601	0,278	0,481
0,0005	0,0524	0,365	0,365	0,404	0,643	0,349	0,552
0,001	0,108	0,460	0,455	0,513	0,645	0,459	0,646
0,002	0,190	0,580	0,596	0,694	0,740	0,635	0,820
0,005	0,300	0,787	0,895	0,972	1,040	1,130	1,295
0,010	0,425	0,990	1,240	1,250	1,350	1,730	1,830
0,015	0,520	1,132	1,507	1,440	1,560	2,220	2,250
0,020	0,602	1,247	1,735	1,590	1,495	2,630	2,590
0,030	0,736	1,430	2,120	1,820	1,750	3,340	3,170

Для однородного состава наносов, при котором $d=d_к$, уравнение В. Н. Гончарова по определению предельной размывающей скорости можно записать в виде:

$$u_0 = \sqrt{\frac{2g(\gamma_1-\gamma)}{1{,}75\gamma}d}\cdot\lg\frac{8{,}8R}{d}\ м/сек$$

или

$$u_0 = 3{,}36\sqrt{\frac{\gamma_1-\gamma}{\gamma}d}\lg\frac{8{,}8R}{d}\ м/сек. \qquad (125)$$

Уравнение (125) позволяет определить предельную размывающую скорость потока u_0 для заданного однородного состава наносов с диаметром частиц d.

Очевидно, что по уравнению (125) можно определить и предельный диаметр d_{max} частиц наносов, которые при заданной средней скорости течения v и гидравлическом радиусе R поток воды в состоянии передвигать. Следует заметить, что этот прием определения наибольшего диаметра частиц уже применялся отдельными исследователями. В частности, Г. И. Шамов, использовав свою формулу (122) по определению размывающей скорости, получил следующее уравнение для вычисления наибольшего диаметра частиц, передвигаемых потоком:

$$d_{max} = \frac{v^3}{4{,}6^3 R^{0,5}}\ м. \qquad (126)$$

Если же для этой цели использовать уравнение (125) В. Н. Гончарова, получится:

$$v = 3{,}36\sqrt{\frac{\gamma_1-\gamma}{\gamma}d_{max}}\lg\frac{8{,}8R}{d_{max}}\ м/сек. \qquad (127)$$

Уравнение (127) можно представить в виде:

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8R}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}088\frac{\gamma}{\gamma_1-\gamma}v^2. \qquad (128)$$

При $\gamma_1=2{,}65$ и $\gamma=1{,}0$ выражение наибольшего диаметра будет:

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8R}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053v^2. \qquad (128а)$$

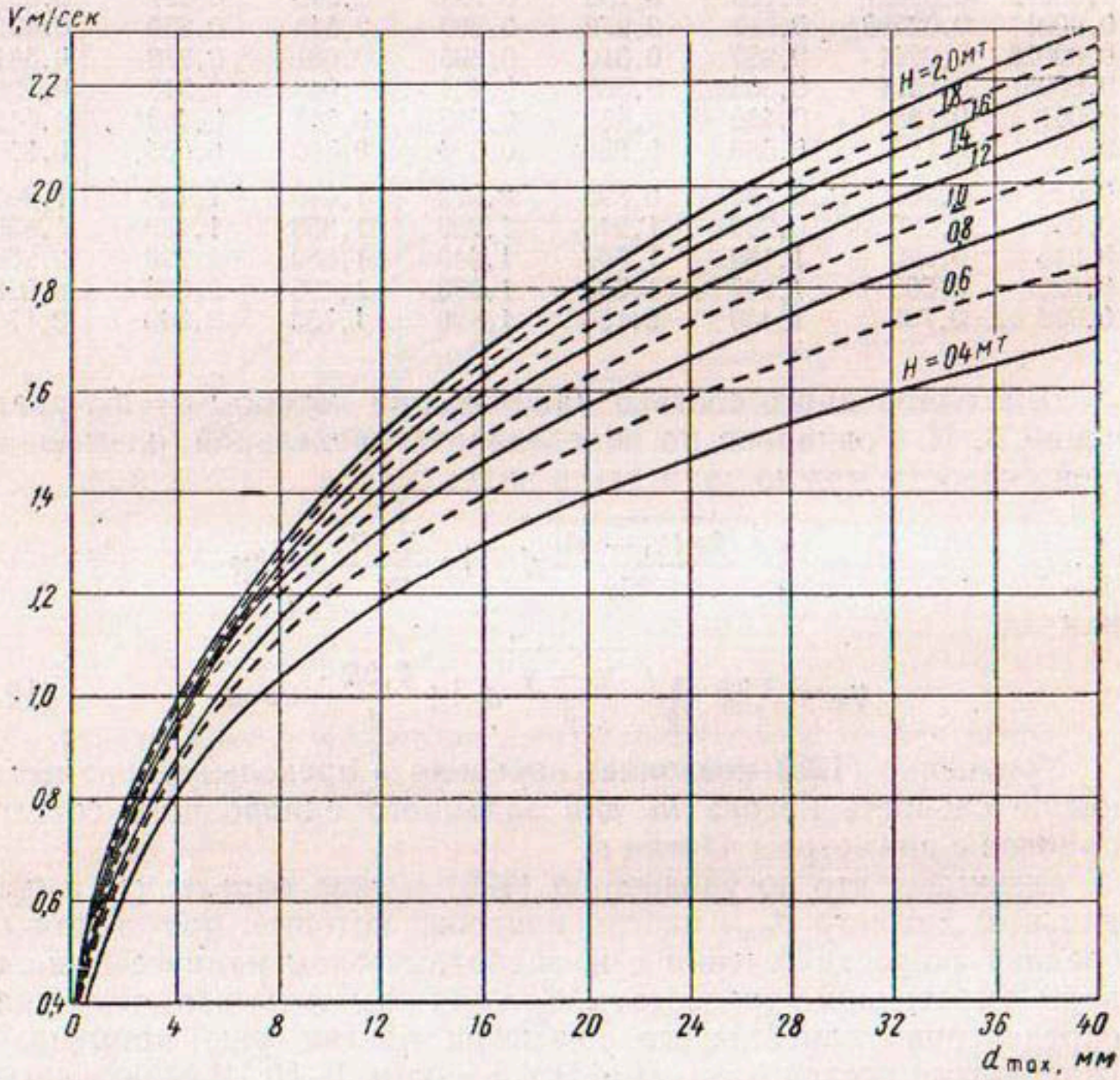


Рис. 19. Кривые зависимости $v=f(d_{max})$ для разных глубин потока.

По формуле (128а) подбором можно определить значение d_{max} и найти соответствующую ему наибольшую гидравлическую крупность частиц донных наносов $u_д$.

При широких потоках гидравлический радиус R можно заменить глубиной H, тогда:

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8H}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053v^2. \qquad (128б)$$

На рисунке 19 приведены кривые зависимости наибольшего диаметра частиц наносов от скоростей течения воды $d_{max}=f(v)$, которые при различных глубинах поток может передвигать в донном состоянии. Использование этих кривых облегчает расчеты по подбору величины наибольшего диаметра частиц d_{max} и соответствующей ему гидравлической крупности донных наносов $u_д$.

§ 9. Наименьшая крупность частиц донных наносов

Донные наносы образуются вследствие осаждения крупных взвешенных частиц и размыва русла. Поэтому наименьшая крупность частиц донных наносов зависит от состава взвешенных наносов и степени насыщения ими потока, а также от крупности частиц, слагающих русло потока. При насыщении потока наносами с частицами всех крупностей наименьшая гидравлическая крупность как для взвешенных, так и для донных наносов равна w_1 и определяется по данным фракционного состава взвешенных наносов [23]. Таким образом, для этого случая $w_{min\,д}=w_{min\,в}=w_1$, где $w_{min\,д}$, $w_{min\,в}$ представляют наименьшие гидравлические крупности частиц донных и взвешенных наносов.

Но обычно речные потоки не насыщены взвешенными наносами в отношении мелких частиц. Поэтому такие частицы полностью взвешиваются потоком и в составе донных наносов их нет.

При заданных значениях $u_в$, w_{n+1}, c_0 и $c_т$ поток не насыщается взвешенными частицами наносов с гидравлической крупностью меньше w_x и образование донных наносов в результате осаждения взвешенных наносов произойдет только за счет частиц с крупностью больше w_x. Поэтому наименьшая гидравлическая крупность донных наносов при образовании их осаждающимися частицами и при отсутствии размыва русла будет:

$$w_{min\,д}=w_x=\frac{c_т-c_0}{a_т-a_0}\ м/сек, \qquad (129)$$

где

$$a_т=\frac{c_т}{u_в}\ и\ a_0=\frac{c_0}{w_{n+1}}.$$

Причем значение w_x, рассчитанное по формуле, получается значительно больше наименьшей крупности частиц наносов обычного состава русел рек, состоящих из несвязных грунтов. Например, в среднем течении Аму-Дарьи при скорости 1,5 *м/сек* и глубине 4 *м* мутность колеблется в пределах 3—5 *кг/м*³. При этом предельные крупности частиц в среднем составляют $w_1=0{,}04$ и

$w_{n+1}=14{,}5$ *мм/сек*. Принимая коэффициент шероховатости $n=0{,}0225$, вычисляем:

$$u_в = \frac{0{,}065 n^{0,5} v^{0,5} (v-0{,}05)}{H^{1/3}} = \frac{0{,}065 \cdot 0{,}0225^{0,5} \cdot 1{,}5^{0,5} \cdot 1{,}45}{4^{1/3}} =$$

$$= 0{,}0109 \text{ м/сек} = 10{,}9 \text{ мм/сек},$$

$$c_т = 200\, u_в = 2{,}18 \text{ кг/м}^3.$$

Для средней мутности $\rho_0=4{,}0$ *кг/м*^{3}

$$c_0 = \frac{4{,}0}{\ln \frac{14{,}5}{0{,}04} - 1} = 0{,}82 \text{ кг/м}^3.$$

После подстановки этих значений в (129) получается:

$$w_x = \frac{2{,}18 - 0{,}82}{\frac{2{,}18}{0{,}0109} - \frac{0{,}82}{0{,}0145}} = 0{,}0095 \text{ м/сек} = 9{,}5 \text{ мм/сек}.$$

Таким образом, имеется избыток взвешенных наносов за счет частиц с гидравлической крупностью больше 9,5 *мм/сек*. Поэтому донные наносы, которые образуются за счет осаждения этого избытка, состоят из частиц с гидравлической крупностью больше 9,5 *мм/сек* ($d=0{,}12$ *мм*). Между тем, как показывают наблюдения, донные отложения на этом участке Аму-Дарьи состоят в основном из частиц крупнее 0,05 *мм*, причем 90% из них крупнее 0,1 *мм*. Следовательно, донные отложения в приведенном примере имеют наименьший диаметр частиц 0,05 *мм*, что соответствует гидравлической крупности около 2 *мм/сек*, т. е. наименьшая гидравлическая крупность частиц донных отложений значительно меньше w_x, определяемой по формуле (129). Очевидно, в таких условиях будет происходить размыв русла и насыщение потока взвешенными и донными наносами, причем значение наименьшей гидравлической крупности частиц донных наносов будет отличаться от w_x в зависимости от их состава и степени насыщения потока взвешенными наносами.

На основании изложенного можно сделать вывод, что в водотоках с неразмываемым руслом, при избыточном количестве взвешенных наносов, донные наносы образуются из этого избытка с наименьшей гидравлической крупностью частиц $w_{\min д}=w_x$. Если же русло водотока подвержено размыву и содержит частицы с крупностью w_0 меньше w_x, то $w_0<w_{\min д}<w_x$. Наконец, если при размываемом русле мутность потока соответствует его транспортирующей способности, то наименьшие гидравлические крупности донных наносов $w_{\min д}$ и донных отложений w_0 будут иметь одинаковое значение, т. е. $w_{\min д}=w_0$.

При гидравлическом смыве наносных отложений из отстойников и каналов значение транспортирующей способности пото-

ка обычно превышает его начальную мутность. Вследствие этого образование донных наносов в них происходит за счет размыва наносов донных отложений. Донные отложения, как было указано (§ 5), содержат частицы крупностью от $w_{\min з}$ до $w_{(n+1)з}$. При этом преобладающее количество частиц в донных отложениях имеют не наименьшую, а некоторую среднюю крупность. В то же время кривая распределения наносов, которыми нужно дополнительно насыщать поток при промывке, имеет наибольшую ординату для частиц с минимальной гидравлической крупностью. Из-за несоответствия в характерах распределения по крупности донных отложений и наносов, которые поток при промыве в состоянии дополнительно транспортировать, полного насыщения потока мелкими наносами при промыве отстойника не происходит. Это видно из ри-

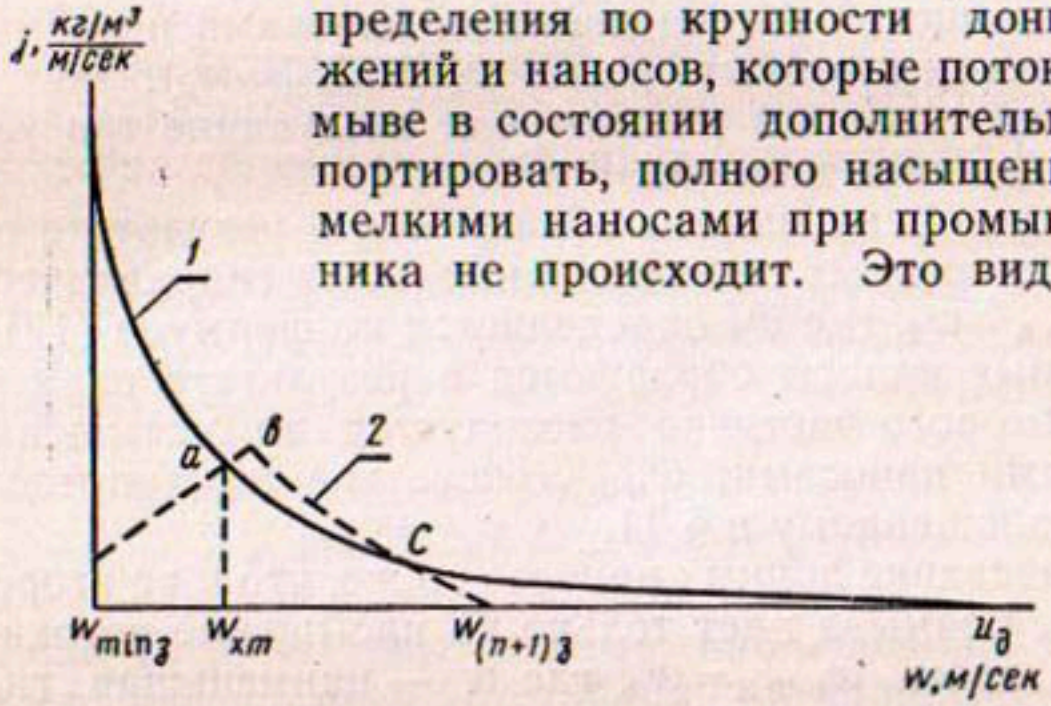


Рис. 20. Кривые распределения по крупности наносов:

1 — мутности, соответствующей $\rho_{тп} - \rho_{оп}$; *2* — размытых наносов по промывке отстойника.

сунка 20, на котором сплошной линией показана кривая распределения по крупности недостающего в потоке (1 $м^3$) количества донных и взвешенных наносов и пунктирной линией — распределение по крупности предельного количества наносов, которые попадают в поток в результате размыва донных отложений. При этом допускается наличие равенства между площадями *abc* и $w_{(n+1)з}cu_д$. Поток можно насыщать наносами донных отложений только с крупностью частиц больше w_{xm}. Поэтому при вычислении количества донных наносов наименьшую гидравлическую крупность при промыве нужно принять $w_{\min д} = w_{xm}$.

При заданных гидравлических элементах потока, величине и составе начальной мутности $\rho_{оп}$, а также при заданном составе осевших в отстойнике наносов $\rho_з$ можно насыщать поток только крупными частицами (рис. 20). Если допустить, что размыв донных отложений происходит послойно без изменения гранулометрического состава их, то значение наименьшей гидравлической крупности частиц, которыми поток насыщается при промыве,

составит w_{xm} и будет зависеть от фракционного состава донных отложений, а следовательно, и от величины мутности, от гидравлического режима при отстаивании наносов, а также от транспортирующей способности потока при промыве отстойника. Метод определения значения w_{xm} приведен в § 11.

На практике бывают случаи, когда русло размывается, но продукт размыва состоит из крупных частиц, которые поток не в состоянии взвешивать. При этом наименьшая гидравлическая крупность частиц донных отложений больше взвешивающей скорости потока, т. е. $w_0 > u_в$. Здесь продукт размыва полностью идет на насыщение потока донными наносами и наименьшая их гидравлическая крупность равна w_0 ($w_{\min д} = w_0$).

Таким образом, мы рассмотрели следующие три условия образования донных наносов.

1. Когда донные наносы образуются в результате осаждения избытка взвешенных наносов, наименьшая гидравлическая крупность $w_{\min д} = w_x$, где w_x определяется по формуле (12).

2. Донные наносы образуются в результате размыва русла, продукт которого частично расходуется на насыщении потока взвешенными наносами; $w_{\min д} = w_{xm}$, где w_{xm} определяется по способу, изложенному в § 11.

3. Образование донных наносов то же, что и во втором случае, но продукт размыва идет только на насыщение потока донными наносами; здесь $w_{\min д} = w_0$, где w_0 — наименьшая гидравлическая крупность частиц донных отложений и определяется по данным фракционного анализа.

§ 10. Значение постоянной $c_д$ кривой распределения по крупности донных наносов

Для построения кривой распределения по крупности частиц и вычисления количества донных наносов, транспортируемых потоком, необходимо иметь значения постоянной $c_д$ этой кривой.

Для определения значения $c_д$ можно сделать следующие допущения.

1. Значение $c_д$, как и значение $c_т$ кривой распределения взвешенных наносов, транспортируемых потоком [23], является постоянной при заданных гидравлических элементах потока и меняется с изменением последних.

2. По аналогии с $c_т$ учет влияния гидравлических элементов потока на значение $c_д$ можно выразить через предельную гидравлическую крупность донных наносов $u_д$:

$$c_д = f(u_д). \qquad (130)$$

3. Решение зависимости (130) затруднено из-за отсутствия необходимых данных исследований. В настоящей работе в каче-

стве первого приближения связь между значениями $c_д$ и $u_д$ с известным основанием принята линейной в виде:

$$c_д = ku_д . \qquad (130а)$$

Следует напомнить, что аналогичная связь была получена для значения постоянной кривой распределения взвешенных наносов $c_т$ и наибольшей взвешивающей скорости $u_в$:

$$c_т = 200u_в.$$

Указанное допущение основано на том, что в обоих случаях определяется количественная способность потока по транспортированию наносов (взвешенных или донных).

Учитывая зависимость (130а), уравнение (114) для определения количества донных наносов, приходящихся на 1 $м^3$, можно написать в виде:

$$\rho_д = ku_д\left[\ln\frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)w_{\min д}\right] кг/м^3, \qquad (131)$$

откуда получим:

$$k = \frac{\rho_д}{u_д\left[\ln\frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)w_{\min д}\right]} . \qquad (132)$$

В таблице 15 приведены данные наблюдений, полученные при исследованиях промыва отстойника на канале Куль-Арык и крупномасштабной модели отстойника на головном участке Каракумского канала [21], а также данные для среднего гидравлического режима Аму-Дарьи. Для этого случая на основании многочисленных исследований в районе канала Таш-Сака [23] количество донных наносов принято равным 10% от взвешенных наносов, переносимых потоком в соответствии с его транспортирующей способностью ($\rho_д = 0{,}1\,\rho_т$). Кроме того, в таблице даны вычисленные значения $u_в$, $u_д$ и k. При расчетах значение наименьшей гидравлической крупности наносов $w_{\min д}$ принимаем 0,002 *м/сек* (соответствует диаметру частиц 0,05 *мм*). По данным наблюдений, в условиях Аму-Дарьи в составе донных наносов частиц с диаметром меньше 0,05 *мм* почти не было.

Значение a подсчитывали по формуле:

$$a = u_д\left[\ln\frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right)w_{\min д}\right]. \qquad (133)$$

Следует заметить, что специальных исследований по определению величины k нет. Значения $\rho_д$, приведенные в таблице 15, получены не при непосредственных измерениях расхода донных наносов, а путем расчета по методу баланса [23], который в условиях канала Куль-Арык и модели отстойника Каракумского канала дает приближенное решение. Вследствие этого среднее значение $k = 0{,}73$ следует считать первым приближением, которое

ТАБЛИЦА 15

Данные по определению коэффициента k

Место наблюдений	Время наблюдений	$\rho_д$, кг/м³	v, м/сек	H, м	$u_в$, мм/сек	$u_д$, мм/сек	a, м/сек	k, $\frac{кг}{м^3}\Big/\frac{м}{сек}$
Модель отстойника на Каракумском канале . . .	27/V 1958 г.	0,70	0,83	0,50	6,75	0,269	0,86	0,815
То же . .	5/VII 1958 г.	0,69	0,99	0,47	11,7	0,346	1,05	0,655
» » . . .	14/VII 1958 г.	0,89	0,87	0,31	11,0	0,319	1,02	0,870
» » . . .	24/VII 1958 г.	0,83	1,05	0,24	21,7	0,47	1,41	0,590
Отстойник на канале Куль-Арык .	23/V 1946 г.	1,18	1,33	0,59	17,2	0,505	1,64	0,720
То же . . .	10/VI 1946 г.	1,11	1,32	0,68	16,2	0,485	1,54	0,720
р. Аму-Дарья	—	1,31	1,70	4,0	13,6	0,487	1,68	0,780
						Среднее значение		0,73

необходимо подвергнуть уточнению на основании специально поставленных опытов. Итак, $c_д$ в первом приближении можно определить по зависимости:

$$c_д = 0{,}73 u_д \ кг/м^3. \qquad (134а)$$

А. Г. Нацвлишвили в 1960—1961 гг. проводил исследования смыва наносных отложений из отстойника Баграм-Тапинского гидроузла [18], на основании которых получил следующую формулу для определения $c_д$:

$$c_д = 0{,}9\,(u_д - 0{,}02) \ кг/м^3. \qquad (134б)$$

В формулах (134а) и (134б) величины 0,73 и 0,9 выражены в $\frac{кг/м^3}{м/сек}$, а 0,02— в *м/сек*.

Взяв значение $c_д$ по формуле (134а), уравнение для определения количества донных наносов, которое 1 $м^3$ воды в состоянии транспортировать, в первом приближении можно написать в виде:

$$\rho_д = 0{,}73 u_д \left[\ln \frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right) w_{\min д}\right] кг/м^3. \qquad (135)$$

В таблице 16 приведены результаты расчета количества донных наносов по формулам Шамова, Леви, Гончарова и по формуле автора. Здесь же приводится количество донных наносов по данным опытных измерений. Расчет по формуле (135) сделан при $w_{\min д} = 0{,}002$ *м/сек*.

Сравнивая результаты расчета по различным формулам, можно заметить большое расхождение. Более удовлетворительные данные получаются при вычислении $\rho_д$ по формуле (135).

§ 11. Расчет предельного насыщения потока в отстойнике при его промыве

Для расчетов сделаны следующие допущения.

1. Размыв отложений в отстойнике происходит послойно без образования отмостки, и поэтому состав отложений в процессе промывки не меняется. Вследствие этого продукт размыва, попадающий в поток, и осаждающиеся в отстойнике наносы в межпромывной период одинаковы по составу: имеют одни и те же кривые распределения по крупности.

2. Как при осаждении наносов, так и при промыве отстойника донные наносы в него не допускаются, т. е. движения донных наносов в начале отстойника нет.

3. При промывах на определенном расстоянии поток достигает критического состояния насыщения донными и взвешенными наносами.

4. Если в наносных отложениях нет крупных частиц, поток насыщается более мелкими наносами с весовым количеством, равным весу недостающих крупных частиц [23].

Ввиду некоторой условности указанных допущений расчет промыва отстойников, приведенный ниже, носит приближенный характер.

Если вес донных наносов, приходящийся на 1 $м^3$ воды, обозначить $\rho_{дп}$ и транспортирующую способность потока при промыве $\rho_{тп}$, то полное количество наносов, которое данный поток может транспортировать при достаточном количестве наносов необходимой крупности, в соответствии с уравнением (90) составит:

$$\rho_{т(в.д)} = \rho_{тп} + \rho_{дп} \ кг/м^3.$$

Очевидно, что размыв отложившихся в отстойнике наносов всех фракций при заданных гидравлических элементах потока будет обеспечен, если наибольшая гидравлическая крупность осевших наносов в отстойнике $w_{(n+1)з}$ и наибольшая крупность наносов источника при промыве $w_{(n+1)п}$ будет меньше, чем наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов $w = u_{дп}$, которые поток может транспортировать в донном состоянии, а полная транспортирующая способность потока $\rho_{т(в.д)}$ больше начальной мутности при промыве. Если взвешивающая скорость потока $u_{вп}$ также больше, чем $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$, то продукт размыва русла может насыщать поток всеми крупностями частиц наносов, часть которых, состоящая из более крупных частиц, будет транспортироваться по дну и в придонном слое.

При значении $u_{вп}$ меньше $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$ взвешивается только часть наносов, имеющих $w < u_{вп}$. Частицы же с гидравлической крупностью более $u_{вп}$ будут передвигаться по дну и в придонном слое потока. Размыв наносных отложений произойдет в этом случае, если расчетное весовое количество донных и при-

донных наносов на 1 $м^3$ воды будет равно или больше веса крупных частиц, содержащихся в продукте размыва, приходящегося также на 1 $м^3$ водного потока, и веса частиц, осаждающихся из начальной мутности $\rho_{оп}$. В противном случае размыв донных отложений замедлится, и поток не будет насыщен взвешенными наносами. При этом имеется в виду, что поток способен транспортировать в придонном слое частицы наибольшей крупности, содержащиеся в наносных отложениях и поступающие из источника при промыве.

Ниже приведены выводы уравнений для различных соотношений величин $u_{вп}$, $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$. Взаимодействия между ними могут быть таковы: $u_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$;

$u_{вп} < w_{(n+1)п} < w_{(n+1)з}$; $u_{вп} < w_{(n+1)п} = w_{(n+1)з}$; $w_{(n+1)з} < u_{вп} < w_{(n+1)п}$; $w_{(n+1)п} < u_{вп} < w_{(n+1)з}$; $w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п} < u_{вп}$; $w_{(n+1)п} < w_{(n+1)з} < u_{вп}$; $w_{(n+1)п} = w_{(n+1)з} < u_{вп}$.

Как уже говорилось, значение $u_{дп}$ при промыве должно быть больше наибольших гидравлических крупностей частиц $w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)п}$.

А. Рассмотрим условия насыщения потока наносами при промыве отстойника, когда значение взвешивающей скорости $u_{вп}$ меньше, чем наибольшая крупность частиц наносных отложений $w_{(n+1)з}$ и наносов источника при промыве $w_{(n+1)п}$. Допустим $w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$, тогда $u_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$.

По заданным гидравлическим элементам потока по формуле (128) определяем наибольший диаметр d_{max} и гидравлическую крупность частиц $u_{дп}$, которые будут передвигаться потоком по дну. По формуле (135) определяем количество донных наносов на 1 $м^3$ воды $\rho_{дп}$.

На рисунке 21 линией *1* показано распределение по крупности наносов, которые отложились в отстойнике в период между промывами из 1 $м^3$ воды при начальной мутности потока $\rho_{оз}$. Общее количество наносов из 1 $м^3$ воды составляет $\rho_з$. Кривая *2* обозначает распределение по крупности наносов источника (начальной мутности) при промыве отстойника. Общее количество этих наносов (мутность) выражается через $\rho_{оп}$. Линией *3* показано распределение по крупности взвешенных наносов при насыщении потока до его транспортирующей способности. Полное количество этих наносов составляет $\rho_{тп}$. На рисунке 21, *а* $u_{вз}$ и $w_{нз}$ обозначают соответственно взвешивающую скорость потока и наибольшую гидравлическую крупность частиц, оставшихся во взвешенном состоянии на выходе из отстойника при осаждении наносов в межпромывной период, а $w_{min\,з}$ — наименьшую гидравлическую крупность осевших в отстойнике наносов. Величина последней в зависимости от режима осаждения составляет $w_{1з}$ или $w_{хз}$.

Как видно из рисунка, кривые распределения наносов $\rho_{тп}$ и начальной мутности при промыве $\rho_{0п}$ пересекаются в точке, абсцисса которой $w = w_{хп}$. Это означает, что при промыве часть наносов начальной мутности с крупностью более $w_{хп}$ является избыточной. Такие наносы опускаются в нижние слои потока и продолжают двигаться как донные. Количество последних равно разности начальной мутности и транспортирующей способности потока при промыве с гидравлической крупностью частиц более $w_{хп}$ и определяется по формуле:

$$\rho_{ип} = \rho_{оп}\,[\,w_{хп},\ w_{(n+1)п}\,] - \rho_{тп}\,(\,w_{хп}\,,\ u_{вп}) \quad кг/м^3. \qquad (136)$$

Далее рассмотрим характер насыщения потока наносами, отложившимися до промывки отстойника. Допустим, что для предельного насыщения потока наносами необходимо в каждый кубический метр воды подавать m порций наносов из продукта размыва донных отложений. При этом каждая порция подаваемых в поток наносов осаждается из 1 $м^3$ воды в период заиления отстойника и равна $\rho_з$ (заштрихованная площадь на рисунке 21, $а$).

Очевидно, что в пределе поток будет насыщаться взвешенными наносами с крупностью частиц меньше $w_{хп}$, а количество нано-

ТАБЛИЦА 16

Результаты расчета количества донных наносов по разным формулам

Место наблюдений	Время наблюдения	v, м/сек	H, м	$\rho_{д\ изм}$, кг/м³	Значение $\rho_д$, вычисленное по формуле (кг/м³)			
					Шамова	Леви	Гончарова	Хачатряна (135)
Модель Каракумского отстойника . . .	19/V 1958 г.	0,78	0,38	0,135	0,39	1,04	5,90	0,64
То же . . .	27/V 1958 г.	0,83	0,50	0,70	0,39	0,88	4,80	0,63
» » . . .	9/VI 1958 г.	0,86	0,50	0,28	0,44	0,98	5,40	0,65
» » . . .	5/VII 1958 г.	0,99	0,47	0,69	0,76	1,66	9,05	0,81
» » . .	14/VII 1958 г.	0,87	0,31	0,89	0,99	1,87	10,40	0,74
» » . . .	24/VII 1958 г.	1,05	0,24	0,83	2,74	4,69	26,40	1,02
Отстойник на канале Куль-Арык .	23/V 1946 г.	1,33	0,59	1,18	1,09	18,70	16,90	1,20
	10/VII 1946 г.	1,32	0,68	1,11	0,33	6,35	4,12	1,16
То же . . .	19/VII 1946 г.	1,26	1,50	—	0,14	5,72	5,42	0,89
» » . . .	6—16/IX 1946 г.	0,70	1,60	1,02	0,02	0,97	0,62	0,42
Для средних условий р. Аму-Дарьи . .	—	1,70	4,00	1,31	0,05	6,46	8,11	1,22
Пример	—	0,95	2,00	—	0,04	2,02	1,22	0,59
» . . .	—	1,40	3,00	—	0,07	0,57	2,43	0,98
» . . .	—	1,87	4,00	—	0,09	0,72	6,90	1,37

сов, насыщающих поток, характеризуется кривой распределения, ординаты которой определяются из уравнения:

$$j_п = j_{тп} - j_{оп}.$$

На рисунке 21, *б* показаны кривые распределения $j_п = j_{тп} - j_{оп}$ (линия *5*) и крупности осевших в отстойнике наносов $\rho_з$, ординаты которой увеличены в m раз для полного насыщения потока (линия *4*).

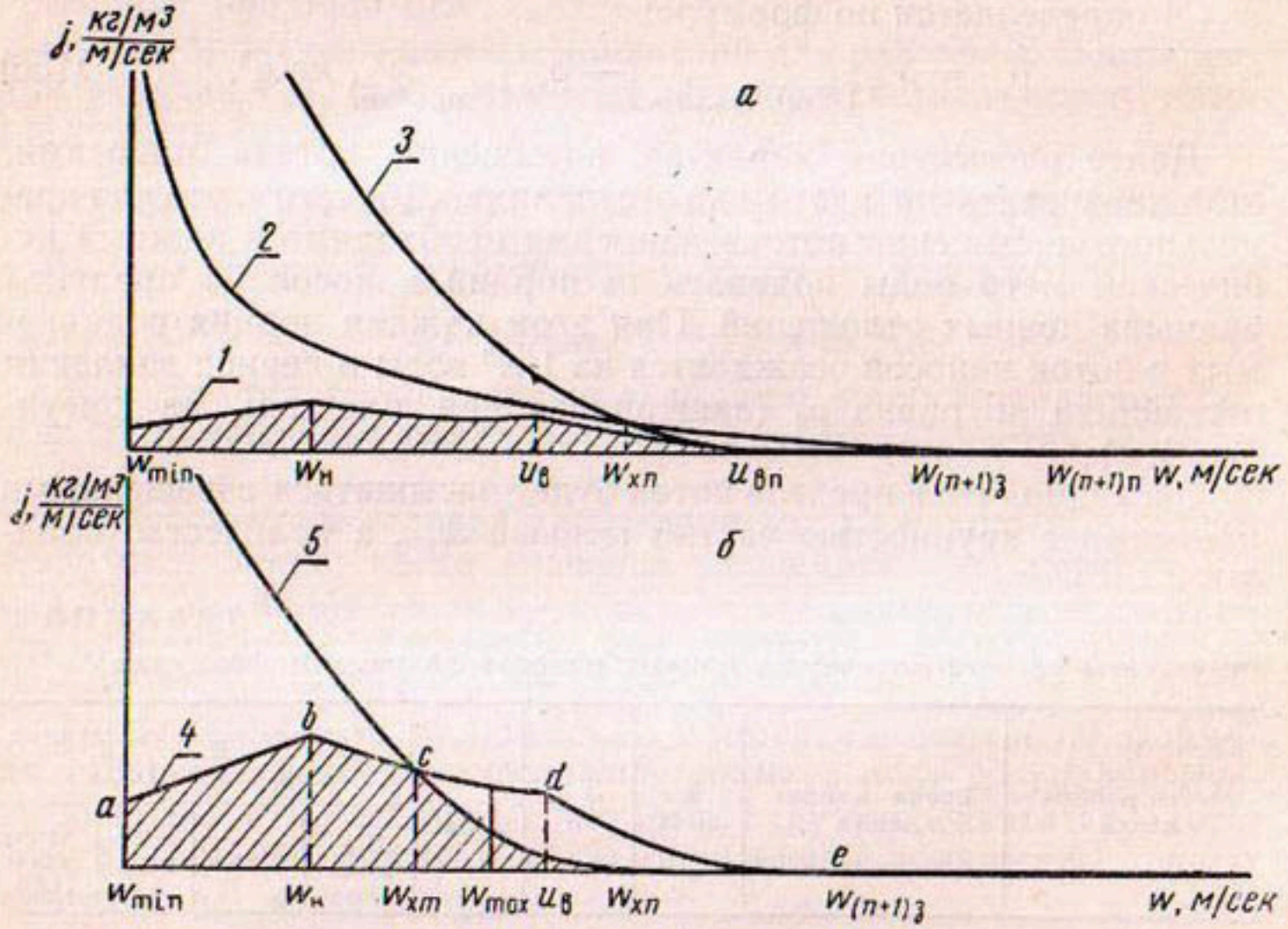


Рис. 21. Кривые распределения наносов при $u_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$:
1 — $j_з = f(w)$; *2* — $j_{оп} = f(w)$; *3* — $j_{тп} = f(w)$; *4* — $j = mj_з = f(w)$;
5 — $j = j_{тп} - j_{оп} = f(w)$.

Поток насыщается взвешенными наносами за счет размыва дна в количестве, равном заштрихованной площади на рисунке 21, *б*. Остальная часть размытых наносов, которая соответствует площади фигуры $cdew_{хп}$, состоит из крупных частиц. Эти наносы потоком не взвешиваются и передвигаются по дну, их количество равно:

$$\rho_{ир} = m\rho_{з\,[w_{хт} \cdot w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{(w_{хт},\, w_{хп},\, c)} \; кг/м^3. \qquad (137)$$

Последний член правой части уравнения (137) выражает разность мутности по транспортирующей способности потока и на-

чальной $\rho_{0п}$ в пределах w_{xm} и $w_{xп}$. Эту разность можно выразить в виде:

$$\rho_{(w_{xm},\ w_{xп},\ c)} = \rho_{тп\,(w_{xm},\ w_{xп})} - \rho_{оп\,(w_{xm},\ w_{xп})}\ кг/м^3. \quad (138)$$

После подстановки значения $\rho_{(W_{xm},\ W_{xп},\ c)}$ в формулу (137) получим:

$$\rho_{ир} = m\rho_{з\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}]} - \left[\rho_{тп\,(w_{xm}\ ,\ w_{xп})} - \rho_{оп\,(w_{xm},\ w_{xп})}\right] кг/м^3. \quad (139)$$

Полное количество наносов, которое нужно транспортировать по дну и в придонном слое потока, получается как сумма избыточной мутности, которая образуется при промыве за счет крупных частиц начальной мутности $\rho_{0п}$ (136) и размытых со дна наносов $\rho_{ир}$ (137):

$$\rho_{дп} = \rho_{ир} + \rho_{ип}\ кг/м^3. \quad (140)$$

Подставив значения $\rho_{ип}$ и $\rho_{ир}$ из формулы (136) и (139) в формулу 140, получим:

$$\rho_{дп} = \rho_{оп\,[w_{xп},\ w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{тп\,(w_{xп},\ u_{вп})} + m\rho_{з\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{тп\,(w_{xm},\ w_{xп})} + \rho_{оп\,(w_{xm},\ w_{xп})}\ кг/м^3. \quad (141)$$

Следующие выражения обозначим так:

$$\rho_{оп\,[w_{xп},\ w_{(n+1)\,п}]} + \rho_{оп\,(w_{xm},\ w_{xп})} = \rho_{оп\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,п}]}\ кг/м^3,$$

$$\rho_{тп\,(w_{xп},\ u_{вп})} + \rho_{тп\,(w_{xm},\ w_{xп})} = \rho_{тп\,(w_{xm},\ u_{вп})}\ кг/м^3.$$

После подстановки их в (141) получим:

$$\rho_{дп}' = m\rho_{з\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}]} + \rho_{оп\,[w_{xm},\ w_{(n+1)п}]} - \rho_{тп\,(w_{xm},\ u_{вп})}\ кг/м^3. \quad (142)$$

Как было указано, в зависимости от состава осевших в отстойнике наносов и величины транспортирующей способности потока последний может не полностью насыщаться наносами при промыве отстойника.

Из рисунка 21, *б* видно, что поток не насыщается мелкими наносами с гидравлической крупностью частиц меньше w_{xm}.

При полном насыщении потока количество наносов, которые транспортируются во взвешенном состоянии, при начальной мутности $\rho_{0п}$ составит:

$$\rho_{пв} = \rho_{тп} - \rho_{оп}\ кг/м^3. \quad (143)$$

На самом же деле количество наносов, которое при промыве дополнительно взвешивается потоком, соответствует заштрихованной площади (рис. 21, *б*) и имеет меньшее значение, чем при

определении его по формуле (143). Оно представляет собой сумму, состоящую из веса наносов, осевших в отстойнике из 1 $м^3$ воды в межпромывной период $\rho_з$ в пределах крупности частиц от $w_{\min з}$ до w_{xm}, взятой m раз, и веса наносов, который получается от разности транспортирующей способности потока $\rho_{тп}$ и начальной мутности при промыве $\rho_{0п}$, взятых в пределах крупностей от w_{xm} до $w_{xп}$. Последнее слагаемое определяется по формуле (138).

Учитывая сказанное, можно написать новое выражение для определения веса частиц наносов $\rho_{пв}$, которые при промыве отстойника дополнительно насыщают поток.

$$\rho_{пв} = m\rho_{з\,(w_{\min з},\, w_{xm})} + \left[\rho_{тп\,(w_{xm},\, w_{xп})} - \rho_{оп\,(w_{xm},\, w_{xп})}\right]. \quad (144)$$

Полное количество наносов $\rho_п$, которое подается в 1 $м^3$ воды для насыщения потока взвешенными и донными наносами, составляет

$$\rho_п = \rho_{пв} + \rho_{дп}\ кг/м^3. \quad (145)$$

Подставляя значения $\rho_{пв}$ и $\rho_{дп}$ из (142) и (144) в уравнение (145), получим:

$$\rho_п = m\rho_{з\,(w_{\min з},\, w_{xm})} + \rho_{тп\,(w_{xm},\, w_{xп})} - \rho_{оп\,(w_{xm},\, w_{xп})} +$$
$$+ m\rho_{з\,[w_{xm},\, w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{оп\,[w_{xm},\, w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{тп\,(w_{xm},\, u_{вп})}\ кг/м^3. \quad (146)$$

Как видно из рисунка 21,

$$m\rho_{з\,(w_{\min з},\, w_{xm})} + m\rho_{з\,[w_{xm},\, w_{(n+1)\,з}]} = m\rho_{з\,[w_{\min з},\, w_{(n+1)\,з}]} = m\rho_з,$$

$$\rho_{тп\,(w_{xm},\, w_{xп})} - \rho_{тп\,(w_{xm},\, u_{вп})} = -\rho_{тп\,(w_{xп},\, u_{вп})};$$

$$\rho_{оп\,[w_{xm},\, w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{оп\,(w_{xm},\, w_{xп})} = \rho_{оп\,[w_{xп},\, w_{(n+1)\,п}]}.$$

Подставляя эти значения в (146), получим:

$$\rho_п = m\rho_{з\,[w_{\min з},\, w_{(n+1)\,з}]} + \left[\rho_{оп\,[w_{xп},\, w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{тп\,(w_{xm},\, u_{вп})}\right] кг/м^3 \quad (146а)$$

или

$$\rho_п = m\rho_з + \left[\rho_{оп\,[w_{xп},\, w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{тп\,(w_{xп},\, u_{вп})}\right] кг/м^3. \quad (146б)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой избыточную мутность при промыве $\rho_{uп}$. Поэтому уравнение (146 б) можно записать в виде:

$$\rho_п = m\rho_з + \rho_{uп}\ кг/м^3. \quad (146в)$$

Для решения этих уравнений ($c_{оп}$, $c_{тп}$, $u_{вп}$, $w_{(n+1)п}$, $w_{(n+1)з}$ и $w_{min\,з}$ обычно известны) значение $\rho_з$ определяют по методу, изложенному в § 5, а значение $w_{хп}$ — по формуле:

$$w_{хп} = \frac{c_{тп} - c_{оп}}{a_{тп} - a_{оп}}, \tag{147}$$

где

$$a_{тп} = \frac{c_{тп}}{u_{вп}}. \tag{147а}$$

и

$$a_{оп} = \frac{c_{оп}}{w_{(n+1)\,п}}. \tag{147б}$$

Остаются неизвестными величины наименьшей гидравлической крупности донных наносов $w_{хт}$ и численного коэффициента m. Для решения этих неизвестных составим два уравнения.

1. На рисунке 21, *б* кривые распределения $j_2 = j_{тп} - j_{оп}$ и $j_1 = mj_з$ пересекаются в точке, имеющей абсциссу $w = w_{хт}$. Вследствие этого равенство между ординатами указанных кривых при $w = w_{хт}$ можно написать в следующем виде:

$$(j_{тп} - j_{оп})_{при\ w = w_{хт}} = mj_{з\,при\ w = w_{хт}},$$

откуда

$$m = \left[\frac{j_{тп} - j_{оп}}{j_з}\right]_{при\ w = w_{хт}}. \tag{148}$$

2. Из того же рисунка видно, что часть размытых со дна наносов должны транспортироваться в донном состоянии. Количество этих наносов определяется по формуле (142).

Если же при промывке происходит осаждение крупных частиц из взвешенных наносов, то эти наносы также передвигаются по дну. Количество их выражено формулой (139).

При подаче в поток m порций крупных частиц наносов, при котором происходит полное насыщение потока донными и придонными наносами, необходимо, чтобы это количество соответствовало транспортирующей способности потока в отношении донных наносов. Тогда на основании (142) можно написать:

$$m = \frac{\rho_{дп} - \rho_{оп}[w_{хт},\ w_{(n+1)\,п}] + \rho_{тп}(w_{хт},\ u_{вп})}{\rho_з[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]}, \tag{149}$$

где значение $\rho_{дп}$ определяется по методу, описанному в § 7, и по формуле (135).

Ввиду равенства левых частей уравнений (148) и (149) можно написать равенство и правых частей этих уравнений.

$$\left[\frac{j_{тп} - j_{оп}}{j_з}\right]_{при\ w = w_{хт}} = \frac{\rho_{дп} - \rho_{оп}[w_{хт},\ w_{(n+1)\,п}] + \rho_{тп}(w_{хт},\ u_{вп})}{\rho_з[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]}. \tag{150}$$

Из уравнения (150) подбором определяем w_{xm}, а по его значению находим величину коэффициента m из формул (148) или (149). Наконец, подставив найденное значение m в формулу (146 б), вычисляем значение $\rho_{п}$. Легко можно показать, что при условиях $u_{вп} < w_{(n+1)п} < w_{(n+1)з}$; $u_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$ и $w_{(n+1)з} < u_{вп} < w_{(n+1)п}$ мы получаем те же формулы для определения $\rho_{ип}$, $\rho_{ир}$, $\rho_{дп}$, $\rho_{пв}$, $\rho_{п}$ и m. В частности, в указанных условиях уравнение для определения значений избыточной мутности $\rho_{ип}$ из наносов от начальной мутности $\rho_{0п}$ при промывке тождественно (136); значение избыточной мутности $\rho_{ир}$ от размытых наносов $m\rho_{з}$ тождественно (137). Количество донных наносов $\rho_{дп}$ определяется по той же формуле (142); уравнение для определения количества наносов, которые взвешиваются в потоке при промыве $\rho_{пв}$ тождественно (144); значение полного количества наносов, которые дополнительно транспортируются потоком в донном и взвешенном состояниях, определяется по формуле (146 б), а значение m по формулам (148) и (149).

Б. Исследуем условия промывок наносных отложений из отстойника при $w_{(n+1)п} < u_{вп} < w_{(n+1)з}$. Эти условия изображены на рисунках 22, *а*, *б*. В этом случае все наносы начальной мутности при промывке транспортируются потоком во взвешенном состоянии (рис. 22, *а*).

$$\rho_{ип} = 0. \tag{151}$$

Часть из общего количества размытых в отстойнике наносов, состоящая из наиболее крупных частиц, не взвешивается потоком. Образуется избыток наносов (рис. 22, *б*) в количестве:

$$\rho_{ир} = m\rho_{з}\left[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}\right] - \left(\rho_{тп}\left(w_{xm},\ u_{вп}\right) - \rho_{оп}\left[w_{xm},\ w_{(n+1)\,п}\right]\right) \text{ кг/м}^3. \tag{151а}$$

Следовательно, общее количество наносов, которое необходимо транспортировать в донном состоянии, составляет:

$$\rho_{дп} = \rho_{ип} + \rho_{ир} = m\rho_{з}\left[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}\right] - \left(\rho_{тп}\left(w_{xm},\ u_{вп}\right) - \rho_{оп}\left[w_{xm},\ w_{(n+1)\,п}\right]\right) \text{ кг/м}^3. \tag{151б}$$

Как видно, формулы (142) и (151б) тождественны. Следовательно, вид формулы по определению количества наносов, транспортируемых в донном состоянии, не зависит от величин $w_{(n+1)п}$ и $u_{вп}$.

В этом случае количество наносов, которое транспортируется во взвешенном состоянии (рис. 22, *б*), выражается формулой:

$$\rho_{пв} = m\rho_{з}\left(w_{min\,з},\ w_{xm}\right) + \left(\rho_{тп}\left(w_{xm},\ u_{вп}\right) - \rho_{оп}\left[w_{xm},\ w_{(n+1)\,п}\right]\right) \text{ кг/м}^3. \tag{152}$$

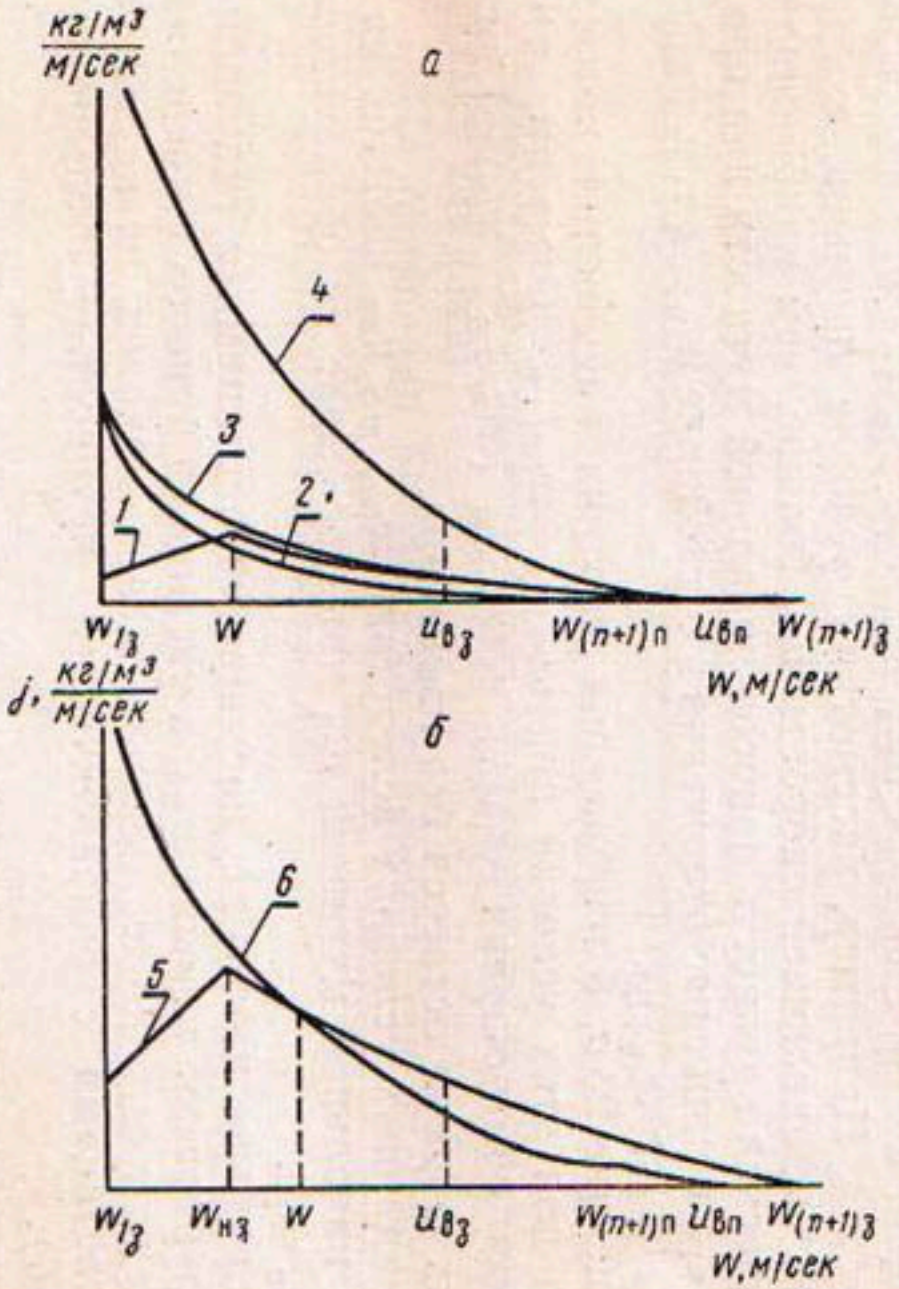


Рис. 22. Кривые распределения наносов по крупности при $w_{(n+1)\,п} < u_{вп}$ и $w_{(n+1)\,з} > u_{вп}$:

$1 - j_з = f(w)$; $2 - j_{оп} = f(w)$; $3 - j_{оз} = f(w)$;
$4 - j_{тп} = f(w)$; $5 - j = m j_з = f(w)$;
$6 - j = j_{тп} - j_{оп} = f(w)$.

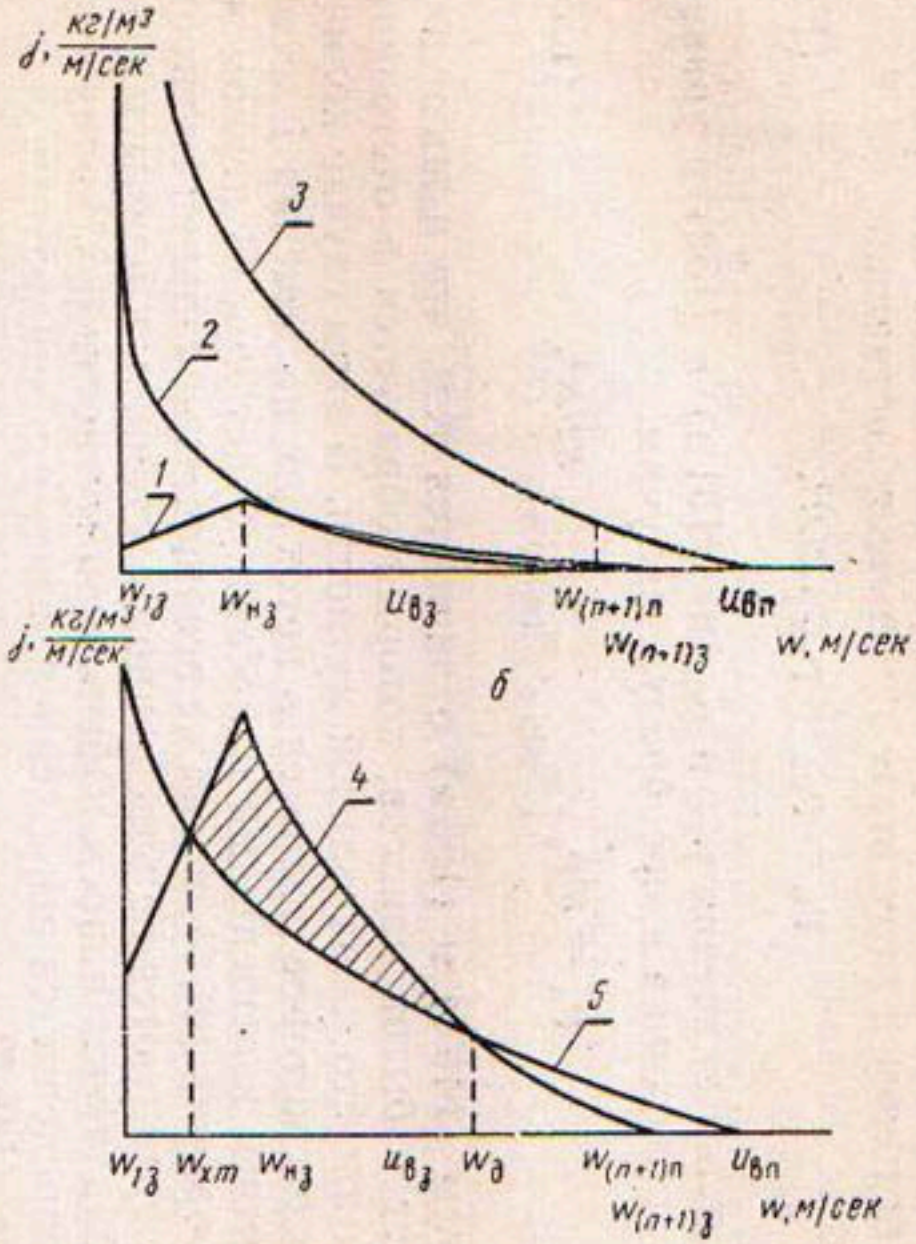


Рис. 23. Кривые распределения наносов по крупности при $w_{(n+1)\,п} = w_{(n+1)\,з} < u_{вп}$:

$1 - j_з = f(w)$; $2 - j_{оп} = f(w)$; $3 - j_{тп} = f(w)$;
$4 - j = m j_з = f(w)$; $5 - j = j_{тп} - j_{оп} = f(w)$.

Таким образом, для указанных условий уравнение (152) по определению $\rho_{пв}$ отличается от (144).

Общее количество наносов, которое дополнительно транспортируется потоком в результате промывки, составляет:

$$\rho_п = \rho_{пв} + \rho_{дп} \ кг/м^3. \qquad (153)$$

Подставляя значения $\rho_{дп}$ и $\rho_{пв}$ из (151 а) и (152) в уравнение (153), объединяя и преобразуя, получим:

$$\rho_п = m\rho_з \left[{}^{w}_{\min з}, {}^{w}_{(n+1)\,з} \right] \ кг/м^3. \qquad (153а)$$

Формулы (146 б) и (153 а) отличаются тем, что в последней отсутствует избыток наносов, который образуется в отстойнике при промывке его из начальной мутности. В этом случае количество наносов, которое подается в поток для насыщения 1 $м^3$ воды донными и взвешенными наносами, будет $m\rho_з$. В первом же случае (формула 146 б), когда не все наносы начальной мутности $\rho_{оп}$ транспортируются во взвешенном состоянии, к размытым наносам добавляются наносы избыточной мутности $\rho_{ип}$, количество которых определяется выражением, взятым в квадратные скобки в формуле (146 б).

Для определения значений m и w_{xm} можно пользоваться теми же уравнениями (148) и (149) или (150).

В. Следует заметить, что такие же расчетные выражения получаются при определении $\rho_{ип}$, $\rho_{ир}$, $\rho_{дп}$, $\rho_{пв}$, $\rho_п$, m и для остальных условий: $w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п} < u_{вп}$; $w_{(n+1)п} < w_{(n+1)з} < u_{вп}$; $w_{(n+1)з} = w_{(n+1)п} < u_{вп}$. Например, рассмотрим условие промыва, когда величина взвешивающей скорости $u_{вп}$ больше, чем наибольшая гидравлическая крупность наносов начальной мутности при промыве $w_{(n+1)п}$ и наносные отложения в отстойнике $w_{(n+1)з}$, т. е. $u_{вп} > w_{(n+1)п}$ и $u_{вп} > w_{(n+1)з}$.

На рисунке 23 *а*, *б* изображена картина насыщения потока наносами для этих условий при $w_{(n+1)з} = w_{(n+1)п}$. Отметим, что при любом соотношении $w_{(n+1)п}$ и $w_{(n+1)з}$ $\left[w_{(n+1)п} \gtrless w_{(n+1)з}\right]$ вид расчетных формул остается без изменения.

При заданных условиях вследствие $w_{(n+1)п} < u_{вп}$ избыток наносов от начальной мутности $\rho_{оп}$ при промывке не образуется, т. е. $\rho_{ип} = 0$.

При промыве поток не насыщается частицами с гидравлической крупностью меньше w_{xm}, а частицами наносов в пределах крупностей от w_{xm} до $w_д$ перенасыщен и, наконец, не насыщен также частицами с гидравлической крупностью больше $w_д$ (рис. 23, *б*).

Избыточное количество наносов средней крупности в этом случае идет на насыщение потока в пределах крупности $w_д$—$u_{вп}$ донными наносами.

Из всего продукта размыва часть наносов поток не в состоянии транспортировать во взвешенном состоянии. Это количество, обозначенное $\rho_{ир}$, можно определить, если из избытка наносов в пределах крупности $w_{хт}$—$w_д$ вычесть количество недостающих наносов с крупностью от $w_д$ до $u_{вп}$. Обозначив избыток наносов в пределах крупности $w_{хт}$—$w_д$ через $\rho_{и(w_{хт}, w_д)}$, а количество недостающих наносов $\rho_{н(w_д, u_{вп})}$, указанное условие можно выразить так:

$$\rho_{ир} = \rho_{и\,(w_{хт},\ w_д)} - \rho_{н\,(w_д,\ u_{вп})}. \qquad (154)$$

Далее (рис. 23) можно написать:

$$\rho_{и\,(w_{хт},\ w_д)} = m\rho_{з\,(w_{хт},\ w_д)} - \left[\rho_{тп\,(w_{хт},\ w_д)} - \rho_{оп(w_{хт},\ w_д)}\right]$$

и

$$\rho_{н\,(w_д,\ u_{вп})} = \rho_{тп\,(w_д,\ u_{вп})} - \rho_{оп\,[w_д,\ w_{(n+1)\,п}]} - m\rho_{з\,[w_д,\ w_{(n+1)\,з}]}.$$

Подставляя эти значения в (154) и принимая, что:

$$m\rho_{з\,(w_{хт},\ w_д)} + m\rho_{з\,[w_д,\ w_{(n+1)\,з}]} = m\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]};$$

$$\rho_{тп\,(w_{хт},\ w_д)} + \rho_{тп\,(w_д,\ u_{вп})} = \rho_{тп\,(w_{хт},\ u_{вп})},$$

$$a\,\rho_{оп\,(w_{хт},\ w_д)} + \rho_{оп\,[w_д,\ w_{(n+1)\,п}]} = \rho_{оп\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,п}]},$$

получим:

$$\rho_{ир} = m\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]} - \Big[\rho_{тп\,(w_{хт},\ u_{вп})} - \rho_{оп\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,п}]}\Big]\ кг/м^3. \qquad (154а)$$

Это уравнение тождественно (151а). Ввиду того что $\rho_{ип}=0$, количество наносов $\rho_{ип}$ будет транспортироваться по дну, т. е.:

$$\rho_{дп} = \rho_{ир}\ кг/м^3. \qquad (155)$$

Подставляя значение $\rho_{ир}$, получаем то же уравнение, что и (151) или (142).

На основании рисунка 23 уравнение для определения количества размытых наносов, транспортируемых во взвешенном состоянии, можно написать в виде:

$$\rho_{пв} = m\rho_{з\,(w_{min\,з},\ w_{хт})} + \left[\rho_{тп\,(w_{хт},\ w_д)} - \rho_{оп\,(w_{хт},\ w_д)}\right] + \left[\rho_{тп\,(w_д,\ u_{вп})} - \rho_{оп\,[w_д,\ w_{(n+1)\,п}]}\right],$$

откуда

$$\rho_{пв} = m\rho_{з\,(w_{min\,з},\ w_{хт})} + \left[\rho_{тп\,(w_{хт},\ u_{вп})} - \rho_{оп\,[w_{хп},\ w_{(n+1)\,п}]}\right]\ кг/м^3. \qquad (156)$$

Значение полного количества размытых наносов $\rho_п$ (ввиду равенства $\rho_{дп}$ и $\rho_{ип}$) получается путем сложения правых частей уравнений (154а) и (156), что дает:

$$\rho_п = \rho_{пв} + \rho_{дп} = m\rho_{з\,[w_{min\,з},\ w_{(n+1)\,з}]}. \qquad (157)$$

Таким образом, уравнения (156) и (157) соответственно тождественны (152) и (153а). Наконец, m и w_{xm} можно определить из уравнений (148) и (149).

Для удобства расчетов в таблице 17 приведены номера формул по определению $\rho_{ип}$, $\rho_{ир}$, $\rho_{дп}$, $\rho_{пв}$, $\rho_п$, m, w_{xm} при различных величинах $u_{вп}$, $w_{(n+1)п}$ и $w_{(n+1)з}$ и при условии, что наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов $u_{дп}$, которые поток в состоянии транспортировать, больше $w_{(n+1)п}$ и $w_{(n+1)з}$.

ТАБЛИЦА 17

№ формул по расчету промыва отстойников в зависимости от гидравлического и наносного режима

Условия промывки	Определяемые значения						
	$\rho_{ип}$	$\rho_{ир}$	$\rho_{дп}$	$\rho_{пв}$	$\rho_п$	m	w_{xm}
$v_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$	136	139	142	144	146а	148	149
$u_{вп} < w_{(n+1)п} < w_{(n+1)з}$	136	139	142	144	146а	148	149
$u_{вп} < w_{(n+1)п} = w_{(n+1)з}$	136	139	142	144	146а	148	149
$w_{(n+1)з} < u_{вп} < w_{(n+1)п}$	136	139	142	144	146а	148	149
$w_{(n+1)п} < u_{вп} < w_{(n+1)з}$	150	151	142	152	153	148	149
$w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п} < u_{вп}$	150	151	142	152	153	148	149
$w_{(n+1)п} < w_{(n+1)\,з} < u_{вп}$	150	151	142	152	153	148	149
$w_{(n+1)п} = w_{(n+1)з} < u_{вп}$	150	151	142	152	153	148	149

Количество наносов $\rho_п$, которое 1 $м^3$ воды при промыве отстойника может дополнительно транспортировать, определяется в зависимости от условий промывки по формулам (146а) и (153а).

Значение $\rho_{з[w_{min\,з},\ w_{(n+1)з}]}$ в этих уравнениях можно выразить через начальную мутность при отстаивании наносов $\rho_{оз}$ и коэффициент k_y, характеризующий степень осветления потока в отстойнике:

$$K_y = \frac{\rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{вз}}{\rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]}} = \frac{\rho_{з\,[w_{min\,з},\ w_{(n+1)\,з}]}}{\rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]}},$$

откуда

$$\rho_{з\,[w_{\min з},\ w_{(n+1)\,з}]} = k_y \rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]}, \qquad (158)$$

где $\rho_{вз}$ — мутность при выходе из отстойника при отстаивании наносов в межпромывной период.

Введя значение $\rho_{з\,[w_{\min з},\ w_{(n+1)\,з}]}$ в (146а) и (153а), получим:

$$\rho_п = mk_y \rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]} + \left[\rho_{оп\,[w_{хп},\ w_{(n+1)\,п}]} - \rho_{тп\,(w_{хп},\ u_{вп})}\right]; \qquad (159)$$

$$\rho_п = mk_y \rho_{оз\,[w_1,\ w_{(n+1)\,з}]}. \qquad (160)$$

В приведенных выше уравнениях приняты обозначения, значение которых определяется:

$$\rho_{оп\,[w_{хп},\ w_{(n+1)\,п}]} = c_{0п}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\,п}}{w_{хп}} - \frac{w_{(n+1)\,п} - w_{хп}}{w_{(n+1)\,п}}\right); \qquad (161а)$$

$$\rho_{оп\,(w_{хm},\ w_{хп})} = c_{0п}\left(\ln\frac{w_{хп}}{w_{хm}} - \frac{w_{хп} - w_{хm}}{w_{(n+1)\,п}}\right); \qquad (161б)$$

$$\rho_{оп\,[w_{хm},\ w_{(n+1)\,п}]} = c_{0п}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\,п}}{w_{хm}} - \frac{w_{(n+1)\,п} - w_{хm}}{w_{(n+1)\,п}}\right); \qquad (161в)$$

$$\rho_{тп\,(w_{хп},\ u_{вп})} = c_{тп}\left(\ln\frac{u_{вп}}{w_{хп}} - \frac{u_{вп} - w_{хп}}{u_{вп}}\right); \qquad (162а)$$

$$\rho_{тп\,(w_{хm},\ w_{хп})} = c_{тп}\left(\ln\frac{w_{хп}}{w_{хm}} - \frac{w_{хп} - w_{хm}}{u_{вп}}\right); \qquad (162б)$$

$$\rho_{тп\,(w_{хm},\ u_{вп})} = c_{тп}\left(\ln\frac{u_{вп}}{w_{хm}} - \frac{u_{вп} - w_{хm}}{u_{вп}}\right); \qquad (162в)$$

$$j_{тп} = c_{тп}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_{вп}}\right);$$

$$j_{оп} = c_{оп}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)\,п}}\right).$$

В этих формулах $w_{хп}$, $c_{тп}$, $u_{вп}$ определяют соответственно по (147), (53) и (54), а $w_{(n+1)п}$ (наибольшая гидравлическая крупность наносов начальной мутности при промыве) — по данным фракционного состава наносов начальной мутности в период промыва отстойника по методу, изложенному в § 4 настоящей работы, $c_{оп}$ вычисляют по формуле (51) для той же начальной мутности и состава наносов при промыве с заменой в ней $\rho_{0з}$, $w_{1з}$ и $w_{(n+1)з}$ на $\rho_{0п}$, $w_{1п}$ и $w_{(n+1)п}$. Что же касается значений $j_з$, $\rho_{з\,[w_{хm},\ w_{(n+1)\,з}]}$, $\rho_{з\,(w_{\min з},\ w_{хm})}$ и $\rho_{з\,[w_{\min з},\ w_{(n+1)\,з}]}$, то вид уравнений для определения их меняется в зависимости от расчет-

ной области при отстаивании наносов и от величины w_{xm}. Ниже приведен метод определения этих величин.

1. **Отстаивание наносов в условиях третьей расчетной области** $w_{нз} < u_{вз}$. Третья расчетная область отвечает условиям отстаивания наносов, при которых наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов избыточной мутности в конце рассматриваемого промываемого участка (конец отстойника) $w_{нз}$, определяемая по уравнению (59), меньше взвешивающей скорости потока (см. рис. 13). Значение $u_{вз}$ вычисляется по формуле (54).

Для этого случая мутность $\rho_{з[w_{\min з}, w_{(n+1)з}]}$ определяется по формуле (72), в которой значение $w_{1з}$ заменяют на $w_{\min з}$.

Выражение $\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})}$ обозначает количество осевших в отстойнике наносов в пределах крупности $w_{\min з}$, w_{xm}. Значение $w_{\min з}$ находится в пределах $w_{1з} < w_{\min з} \leqslant w_{нз}$, а w_{xm} может иметь любое значение между $w_{\min з}$ и $w_{(n+1)з}$, т. е.:

$$w_{\min з} < w_{xm} < w_{(n+1)з}.$$

При изменении вида кривой распределения осевших в отстойнике наносов вид уравнения по определению $\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})}$ будет меняться в зависимости от значения w_{xm}.

Если $w_{\min з} < w_{xm} < w_{нз}$, значение $\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})}$ находят из уравнения (68), заменив в нем w_i на $w_{\min з}$ и w_{i+1} на w_{xm}. После этого, использовав сокращенные обозначения, получаем формулу:

$$\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})} = \frac{1}{2w_{нз}} \left[a_{оз} b_{оз(w_{\min з}, w_{xm})} - a_{тз} b_{тз(w_{\min з}, w_{xm})} \right] кг/м^3, \quad (163)$$

в которой приняты дополнительные обозначения:

$$b_{оз(w_{\min з}, w_{xm})} = (w_{xm} - w_{\min з})(2w_{(n+1)з} - w_{xm} - w_{\min з}) \quad (163а)$$

и

$$b_{тз(w_{\min з}, w_{xm})} = (w_{xm} - w_{\min з})(2u_{вз} - w_{xm} - w_{\min з}). \quad (163б)$$

При w_{xm} в пределах $w_{нз}$ и $u_{вз}$ значение $\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})}$ получается как сумма (68) и (70), если w_i и w_{i+1} в них заменить соответственно в первом случае на $w_{\min з}$ и $w_{нз}$ и во втором — на $w_{нз}$ и w_{xm}. После преобразования этих выражений получим:

$$\rho_{з(w_{\min з}, w_{xm})} = \rho_{оз(w_{нз}, w_{xm})} - \rho_{тз(w_{нз}, w_{xm})} + \frac{1}{2w_{нз}} \left[a_{оз} b_{оз(w_{\min з}, w_{нз})} - a_{тз} b_{тз(w_{\min з}, w_{нз})} \right] кг/м^3. \quad (164)$$

где

$$\rho_{оз}\left(w_{Нз},\ w_{хт}\right) = c_{оз}\left(\ln\frac{w_{хт}}{w_{Нз}} - \frac{w_{хт}-w_{Нз}}{w_{(n+1)\,з}}\right); \qquad (164а)$$

$$\rho_{тз}\left(w_{Нз},\ w_{хт}\right) = c_{тз}\left(\ln\frac{w_{хт}}{w_{Нз}} - \frac{w_{хт}-w_{Нз}}{u_{вз}}\right). \qquad (164б)$$

Если $w_{хт} > u_{вз}$, то $\rho_{з\,(w_{\min з},\ w_{хт})}$ можно определить как сумму (68), (70), (71), заменив в них значения w_1 и w_{i+1} соответственно на $w_{\min з}$ и $w_{Нз}$, $w_{Нз}$ и $u_{вз}$, $u_{вз}$ и $w_{хт}$. В этом случае после сложения и преобразования получим

$$\rho_{з\,(w_{\min з},\ w_{хт})} = \rho_{оз\,(w_{Нз},\ w_{хт})} - \rho_{тз(w_{Нз},\ u_{вз})} + \\ + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{оз}\,b_{оз\,(w_{\min з},\ w_{Нз})} - a_{тз}\,b_{тз\,(w_{\min з},\ w_{Нз})}\right] кг/м^3, \quad (165)$$

где

$$\rho_{тз(w_{Нз},\ u_{вз})} = c_{тз}\left(\ln\frac{u_{вз}}{w_{Нз}} - \frac{u_{вз}-w_{Нз}}{u_{вз}}\right). \qquad (165а)$$

Далее определим количество осевших в отстойнике наносов (из 1 $м^3$ воды) с гидравлической крупностью частиц больше $w_{хт}$. Очевидно, что величина $w_{хт}$ находится в пределах $w_{\min з}$ и $w_{(n+1)\,з}$, т. е. $w_{\min з} < w_{хт} < w_{(n+1)\,з}$. В этом случае $\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)з}]}$ получится как сумма (68), (70), (71) с заменой в них значений w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{хт}$ и $w_{Нз}$; $w_{Нз}$ и $u_{вз}$; $u_{вз}$ и $w_{(n+1)\,з}$. Таким образом, количество осевших в отстойнике наносов будет:

$$\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]} = \rho_{оз[w_{Нз},\ w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{тз(w_{Нз},\ u_{вз})} + \\ + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{оз}\,b_{оз\,(w_{хт},\ w_{Нз})} - a_{тз}\,b_{тз\,(w_{хт},\ w_{Нз})}\right] кг/м^3. \quad (166)$$

Здесь значение $\rho_{0з[w_{Нз},\ w_{(n+1)з}]}$ имеет вид:

$$\rho_{0з\,[w_{Нз},\ w_{(n+1)\,з}]} = c_{0з}\left(\ln\frac{w_{(n+1)з}}{w_{Нз}} - \frac{w_{(n+1)\,з}-w_{Нз}}{w_{(n+1)\,з}}\right). \qquad (166а)$$

При $w_{Нз} \leqslant w_{хт} \leqslant u_{вз}$ величина $\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)з}]}$ составляет сумму (70) и (71) с заменой w_i на $w_{хт}$ и $u_{вз}$, а w_{i+1} на $u_{вз}$ и $w_{(n+1)\,з}$:

$$\rho_{з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]} = \rho_{0з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)\,з}]} - \rho_{тз\,(w_{хт},\ u_{вз})}\ кг/м^3, \quad (167)$$

где

$$\rho_{0з\,[w_{хт},\ w_{(n+1)з}]} = c_{0з}\left(\ln\frac{w_{(n+1)з}}{w_{хт}} - \frac{w_{(n+1)з}-w_{хт}}{w_{(n+1)з}}\right) \qquad (167а)$$

и

$$\rho_{\text{тз}\,(w_{xm},\,u_{\text{вз}})} = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{u_{\text{вз}}}{w_{xm}} - \frac{u_{\text{вз}} - w_{xm}}{u_{\text{вз}}}\right). \qquad (167\text{б})$$

Наконец, при $u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{(n+1)\,\text{з}}$ значение $\rho_{\text{з}\,[w_{xm},\,w_{(n+1)\text{з}}]}$ в соответствии с (71) вычисляют по формуле:

$$\rho_{\text{з}\,[w_{xm},\,w_{(n+1)\,\text{з}}]} = \rho_{0\text{з}\,[w_{xm},\,w_{(n+1)\,\text{з}}]}. \qquad (168)$$

Что же касается ординаты кривой распределения по крупности осевших в отстойнике наносов $j_{\text{з}}$, то ее значение определяется при $w_{\min\,\text{з}} < w_{xm} < w_{\text{нз}}$ по формуле (66а), при $w_{\text{нз}} < w_{xm} < u_{\text{вз}}$ — по формуле (66б) и при $w_{xm} > u_{\text{вз}}$ — по формуле (66в).

2. **Отстаивание наносов в условиях второй расчетной области** ($u_{\text{вз}} < w_{\text{нз}} < w_{(n+1)\,\text{з}}$). В условиях второй расчетной области при $u_{\text{вз}} < w_{\text{нз}} < w_{(n+1)\text{з}}$, полное значение осевших из 1 $м^3$ воды наносов $\rho_{\text{з}\,[w_{\min\,\text{з}},\,w_{(n+1)\text{з}}]}$ в соответствии с формулой (78) будет:

$$\rho_{\text{з}\,[w_{\min\,\text{з}},\,w_{(n+1)\,\text{з}}]} = \rho_{0\text{з}\,[w_{\text{нз}},\,w_{(n+1)\,\text{з}}]} + \frac{1}{2w_{\text{нз}}}\left[a_{0\text{з}}\,b_{0\text{з}\,(w_{\min\,\text{з}},\,w_{\text{нз}})} - a_{\text{тз}}\,d_{\text{тз}}\right]. \qquad (169)$$

В уравнении (169) приняты обозначения:

$$b_{0\text{з}\,(w_{\min\,\text{з}},\,w_{\text{нз}})} = (w_{\text{нз}} - w_{\min\,\text{з}})\,(2w_{(n+1)\text{з}} - w_{\text{нз}} - w_{\min\,\text{з}}) \qquad (169\text{а})$$

$$d_{\text{тз}} = (u_{\text{вз}} - w_{\min\,\text{з}})^2. \qquad (169\text{б})$$

Количество осевших в отстойнике наносов при крупности их между $w_{\min\,\text{з}}$ и $w_{xm}\left(\rho_{\text{з}(w_{\min\,\text{з}},\,w_{xm})}\right)$, как и в условиях первой области осаждения, зависит от значений $w_{\min\,\text{з}}$ и w_{xm}. Здесь $w_{\min\,\text{з}}$ может быть только в пределах $w_{1\text{з}}$ и $u_{\text{вз}}$, а w_{xm} имеет любое значение в пределах $w_{\min\,\text{з}}$ и $w_{(n+1)\,\text{з}}$:

1) при $w_{\min\,\text{з}} < w_{xm} < u_{\text{вз}}$ значение $\rho_{\text{з}\,(w_{\min\text{з}},\,w_{xm})}$ можно вычислять по формуле (163);

2) при $u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{\text{нз}}$ значение $\rho_{\text{з}\,(w_{\min\text{з}},\,w_{xm})}$ состоит из суммы (68) и (77) с заменой в них w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{\min\,\text{з}}$ и $u_{\text{вз}}$; $u_{\text{вз}}$ и w_{xm}:

$$\rho_{\text{з}\,(w_{\min\,\text{з}},\,w_{xm})} = \frac{1}{2w_{\text{нз}}}\left[a_{0\text{з}}\,b_{0\text{з}\,(w_{\min\,\text{з}},\,w_{xm})} - a_{\text{тз}}\,d_{\text{тз}}\right]; \qquad (170)$$

3) при $w_{\text{нз}} < w_{xm} < w_{(n+1)\,\text{з}}$ определить $\rho_{\text{з}(w_{\min\,\text{з}},\,w_{xm})}$ можно сложением формул (68), (77) и (71), заменив в них значения

w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{\min з}$ и $u_{вз}$; $u_{вз}$ и $w_{Нз}$; $w_{Нз}$ и $w_{хт}$. После суммирования и некоторого преобразования получим:

$$\rho_{з\,(w_{\min з},\, w_{хт})} = \rho_{0з\,(w_{Нз},\, w_{хт})} + \\ + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з(w_{\min з},\, w_{Нз})} - a_{тз}\, d_{тз}\right] кг/м^3. \quad (171)$$

Далее определим значение $\rho_{з[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]}$:

1) при значении $w_{хт}$ в пределах $w_{\min з}$ и $u_{вз}$ ($w_{\min з} < w_{хт} < u_{вз}$) количество осевших в отстойнике из 1 $м^3$ воды наносов с гидравлической крупностью частиц более $w_{хт}$ получается как сумма правых частей уравнений (68), (77) и (71) с заменой в них w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{хт}$ и $u_{вз}$, на $u_{вз}$ и $w_{Нз}$, на $w_{Нз}$ и $w_{(n+1)з}$:

$$\rho_{з\,[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]} = \rho_{0з\,[w_{Нз},\, w_{(n+1)з}]} + \\ + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з\,(w_{хт},\, w_{Нз})} - a_{тз}\, e_{тз}\right] кг/м^3, \quad (172)$$

где

$$e_{тз} = (u_{вз} - w_{хт})^2; \quad (172а)$$

2) при $u_{вз} < w_{хт} < w_{Нз}$ количество осевших в отстойнике наносов $\rho_{з[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]}$ определяют как сумму (77) и (71) с заменой в них w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{хт}$ и $w_{Нз}$ на $w_{Нз}$ и $w_{(n+1)з}$:

$$\rho_{з\,[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]} = \rho_{0з\,[w_{Нз},\, w_{(n+1)з}]} + \\ + \frac{1}{2w_{Нз}}\, a_{0з}\, b_{0з(w_{хт},\, w_{Нз})}\ кг/м^3, \quad (173)$$

где

$$b_{0з\,(w_{хт},\, w_{Нз})} = (w_{Нз} - w_{хт})\,(2w_{(n+1)з} - w_{Нз} - w_{хт}); \quad (173а)$$

3) при $w_{хт} > w_{Нз}$ значение $\rho_{з\,[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]}$ получают по формуле (71) с заменой в ней w_i на $w_{хт}$ и w_{i+1} на $w_{(n+1)з}$. После указанных преобразований формула примет вид:

$$\rho_{з\,[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]} = \rho_{0з\,[w_{хт},\, w_{(n+1)з}]}. \quad (174)$$

Значение ординаты кривой распределения по крупности осевших в отстойнике наносов $j_з$, если осаждение наносов происходило в условиях второй области ($u_{вз} < w_{Нз} < w_{(n+1)з}$), определяется:

при $w_{хт}$ в пределах $w_{\min з} - u_{вз}$ по формуле (66а);
при $w_{хт}$ в пределах $u_{вз} - w_{Нз}$ по формуле (76);
при $w_{хт}$ в пределах $w_{Нз} - w_{(n+1)з}$ по формуле (66в).

3. **Отстаивание наносов в условиях первой расчетной области** ($w_{нз} > w_{(n+1)з}$). В условиях первой расчетной области значение $\rho_{з[w_{\min з},\ w_{(n+1)з}]}$, определяемое по формуле (80), составляет:

$$\rho_{з\,[w_{\min з},\ w_{(n+1)\,з}]} = \frac{1}{2w_{нз}} \left| a_{0з}\, d_{0з} - a_{тз}\, d_{тз} \right| \text{ кг/м}^3, \qquad (175)$$

где

$$d_{0з} = (w_{(n+1)з} - w_{\min_з})^2. \qquad (175а)$$

Мутность осевших в отстойнике наносов в пределах крупности $w_{\min з}$ и w_{xm}, выраженная через $\rho_{з(w_{\min з},\ w_{xm})}$, определяется:

при $w_{\min з} < w_{xm} < u_{вз}$ по формуле (163);
при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)\,з}$ по формуле (170).

Что же касается мутности $\rho_{з[w_{xm},\ w_{(n+1)з}]}$, то ее значение будет:

1) при $w_{\min з} < w_{xm} < u_{вз}$

$$\rho_{з\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}]} = \frac{1}{2w_{нз}} (a_{0з}\, e_{0з} - a_{тз}\, e_{тз}) \text{ кг/м}^3, \qquad (176)$$

где

$$e_{0з} = (w_{(n+1)з} - w_{xm})^2;$$

2) при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$

$$\rho_{з\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,з}]} = \frac{1}{2w_{нз}} a_{0з}\, e_{0з} \text{ кг/м}^3. \qquad (177)$$

Наконец, ординату кривой распределения отложившихся в отстойнике наносов $j_з$ вычисляют: при $w_{\min з} < w_{xm} < u_{вз}$ по формуле (66а), а при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$ по формуле (73).

При значении w_{xm} в пределах $w_{(n+1)\,з}$ и $w_{нз}$ ордината кривой $j_з$ равна нулю.

В приведенных уравнениях наименьшую гидравлическую крупность осевших в отстойнике наносов, обозначенную через $w_{\min з}$ при расчетах нужно заменить на $w_{1з}(w_{\min з} = w_{1з})$, если значение $w_{хз}$, определяемое по формуле (52), получается меньше $w_{1з}$, т. е. если $w_{1з} > w_{хз}$. В противном случае (при $w_{1з} < w_{хз}$) в этих формулах $w_{\min з}$ заменяется на $w_{хз(w_{\min} = w_{хз})}$.

Указанный метод можно применять и при расчете размыва русла реки, если в связи с возведением плотин и образованием водохранилищ нарушен ее бытовой режим, а также при размыве каналов в связи с сооружением на них подпорных сооружений.

Из водохранилищ поток воды поступает в нижний бьеф, почти полностью освобожденный от наносов. Для расчета размыва русла можно пользоваться приведенными выше расчетными формулами, если принять, что значение $\rho_{оп}$ равно нулю (при пол-

ном осветлении потока в верхнем бьефе) или равно остаточной мутности (если в водохранилище происходит только частичное осветление потока). Что касается донных отложений в русле $\rho_з$, то полное их количество удобнее приравнять единице $\rho_{з[w_{1з},\ w_{(n+1)з}]} = \rho_{гр[w_1,\ w_{(n+1)гр}]} = 1$, а состав этих отложений принимают по данным фракционного анализа наносов. Без большой погрешности можно принять распределение по крупности грунта русла реки по зависимости:

$$j_{гр} = c_{гр}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)гр}}\right).$$

При указанном допущении расчет размыва русла значительно облегчается. Например, если мутность потока в нижнем бьефе равна нулю, то уравнения (148) и (149) для определения значений m и w_{xm} принимают вид:

$$m = \left|\frac{j_{тп}}{j_{гр}}\right| \text{ при } w = w_{xm} = \frac{c_{тп}\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{u_{вп}}\right)}{c_{гр}\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{w_{(n+1)гр}}\right)} \qquad (178)$$

и

$$m = \frac{\rho_{дп} + \rho_{тп(w_{xп},\ u_{вп})}}{\rho_{гр[w_{xп},\ w_{(n+1)гр}]}}; \qquad (179а)$$

откуда

$$m = \frac{c_{дп}\left[\ln\frac{u_{дп}}{u_{вп}} - \left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)w_{xm}\right] + c_{тп}\left(\ln\frac{u_{вп}}{w_{xm}} - \frac{u_{вп} - w_{xm}}{u_{вп}}\right)}{c_{гр}\left(\ln\frac{w_{(n+1)гр}}{w_{xm}} - \frac{w_{(n+1)гр} - w_{xm}}{w_{(n+1)гр}}\right)}. \qquad (179б)$$

§ 12. Динамика насыщения потока в отстойнике при промыве

В предыдущем разделе было определено полное количество размыва наносов, при котором поток предельно насыщается взвешенными и донными наносами без рассмотрения процесса взвешивания этих наносов. Очевидно, что без специальных мероприятий по взмучиванию наносов последние будут взвешиваться в отстойнике только под действием вертикальных составляющих пульсационных скоростей турбулентного потока. В этих условиях для полного насыщения потока наносами, т. е. для поднятия достаточного количества наносов с нижних в верхние слои потребуется определенный период времени.

Наносные отложения подвергаются размыву в начале отстойника, а размытые наносы подхватываются пульсационными скоростями и направляются в толщу потока. Если наибольшая гидравлическая крупность частиц наносных отложений $w_{(n+1)з}$ и начальной мутности $w_{(n+1)п}$ имеет меньшее значение, чем взвешивающая скорость потока при промывке $u_{вп}$, взвешиванию подвергаются все частицы продукта размыва без образования донных наносов. Последние в этом случае образуются на достаточном расстоянии от начала отстойника после насыщения потока крупными взвешенными наносами. При условиях $w_{(n+1)з} > u_{вп}$ и $w_{(n+1)н} > u_{вп}$ часть наносов с гидравлической крупностью частиц более $w_{хп}$ (рис. 21) не взвешивается потоком, и образование донных наносов начинается одновременно с насыщением потока взвешенными наносами.

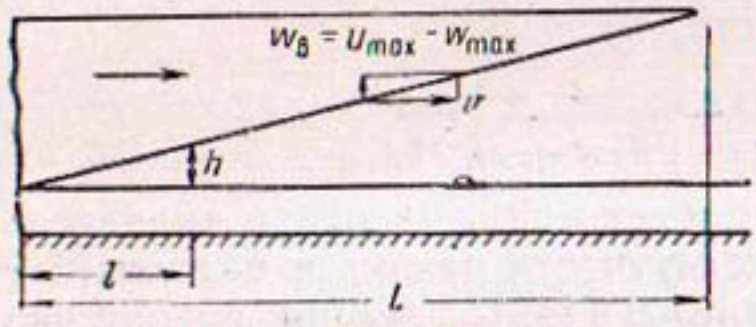


Рис. 24. Схема взвешивания потоком наносов.

Из сказанного следует, что насыщение потока взвешенными наносами начинается у дна и постепенно распространяется на верхние слои.

Скорость взвешивания частиц наносов $w_в$ составляет:

$$w_в = u - w, \tag{180}$$

где u — вертикальная составляющая скорость потока, под действием которой взвешивается частица наносов с гидравлической крупностью w.

Очевидно, что наименьшей скоростью перемещения вверх обладают частицы, входящие в состав взвешиваемых наносов и имеющие наибольшую гидравлическую крупность w_{max}. Значение w_{max} зависит от величины $u_{вп}$ и $w_{(n+1)з}$. Частицы наносов с гидравлической крупностью w_{max} перемещаются вверх потоками жидкости, которые не насыщены взвешенными наносами и сами перемещаются с наибольшими скоростями $u_{в\,max}$. Поэтому для этих частиц можно принять $u = u_{в\,max}$. Как видно из рисунка 21, при $u_{вп} < w_{(n+1)н}$ значение $u_{в\,max} = w_{хп}$. Если же $u_{вп} \geqslant w_{(n+1)н}$, то $u_{в\,max} = u_{вп}$. Следовательно, можно написать, что скорость перемещения вверх крупных частиц наносов составит:

$$w_в = u_{в\,max} - w_{max}. \tag{180а}$$

Через определенный период времени t высота подъема этих частиц составит (рис. 24):

$$h = w_в t = (u_{в\,max} - w_{max})\, t. \tag{118}$$

За это же время частица наносов пройдет путь, который можно принять равным $l = vt$, откуда $t = \frac{l}{v}$. Подставляя значение t в (181), получим:

$$h = w_в \frac{l}{v} = (u_{в\,max} - w_{max}) \frac{l}{v}. \qquad (181а)$$

Из (181а) следует, что при заданной скорости потока на расстоянии l от начала отстойника наиболее крупные частицы поднимаются на высоту h от дна.

За это же время наносы с меньшей крупностью поднимаются в потоке еще выше. Высота подъема мельчайших частиц с гидравлической крупностью w_{min} составит:

$$h_{max} = (u_{в\,max} - w_{min}) \frac{l}{v}. \qquad (181б)$$

Таким образом, слой потока на глубине $h_{max}—h$ на длине отстойника l не насыщается крупными наносами, т. е. верхние слои потока содержат более мелкие частицы. В нижних же слоях потока на высоте h, наоборот, мелких наносов меньше. Из предположения о послойном размыве наносных отложений следует равенство между количествами недостающих в нижнем слое мелких наносов и весом наносов, содержащихся в потоке выше этого слоя.

С увеличением периода t (или при увеличении длины пути насыщения) происходит увеличение содержания крупных частиц в верхних слоях и мелких частиц — в нижних. Полное насыщение потока на всю глубину H частицами, имеющимися в составе донных отложений, наступит только через период времени T. При $T = \frac{L}{v}$:

$$H = (u_{в\,max} - w_{max}) \frac{L}{v}\ м. \qquad (181в)$$

За время T каждый кубометр воды дополнительно насыщается наносами весом $\rho_{пв}$, *кг*. За другой же период t_x, соответствующей длине насыщения l_x, при $T > t_x$ можно считать, что поток насыщается наносами только на глубине h_x. Дополнительное насыщение потока наносами из продукта размыва донных отложений на этом расстоянии в среднем составит:

$$\rho_{пвx} = \rho_{пв} \frac{h_x}{H}\ кг/м^3, \qquad (182)$$

где

$$h_x = (u_{в\,max} - w_{max}) \frac{l_x}{v}\ м.$$

После подстановки h_x в (182) получается:

$$\rho_{пвx} = \rho_{пв} \frac{u_{в\,max} - w_{max}}{Hv}\ l_x\ кг/м^3. \qquad (182а)$$

Формула (182а) представляет собой уравнение динамики насыщения потока наносами в отстойнике при промыве его от наност-

ных отложений. В этой формуле приняты следующие обозначения:

$\rho_{нвх}$ — количество наносов, которыми насыщается 1 $м^3$ воды в отстойнике из продукта размыва донных отложений, $кг/м^3$; определяется по формуле (144);

$u_{в\ max}$ — наибольшее значение взвешивающей скорости потока в отстойнике при промывке, $м/сек$, которое при $u_{вп} < w_{(n+1)п}$ составляет $w_{хп}$, а при $u_{вп} > w_{(n+1)п}$ равно $u_{вп}$; $u_{вп}$ определяется по формуле (91), а $w_{хп}$ по формуле (147);

w_{max} — наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов, насыщающих поток при промывке, $м/сек$;

H и v — глубина, $м$, и скорость потока в отстойнике, $м/сек$;

l_x — длина участка $м$, в конце которого определяется мутность $\rho_{нв\ x}$.

Из уравнения (181в) следует, что предельная длина отстойника L, на которой происходит насыщение потока наносами, составляет:

$$L = \frac{Hv}{u_{в\ max} - w_{max}}\ м. \qquad (183)$$

В связи с этим количество насыщающих поток наносов при промыве в отстойнике длиной $L_0 < L$ вычисляется по формуле (182а). При $L_0 > L$ насыщение потока прекращается в створе отстойника, расположенном на расстоянии L от начала, и ниже створа мутность не меняется. В таком случае мутность на выходе из отстойника определяется по методу, изложенному в § 11.

Для расчета динамики насыщения потока при размыве русла важное значение приобретает правильное определение значения наибольшей гидравлической крупности насыщающих поток частиц наносов w_{max}.

На рисунках 21—23 графически изображены количество и состав взвешенных и донных наносов, которые поток в состоянии транспортировать при насыщении его наносными отложениями заданного состава. Наибольшая крупность взвешенных наносов (рис. 21, *а*, *б*), которыми поток может дополнительно насыщаться, составляет $w_{хп}$, а наименьшая гидравлическая крупность донных наносов — $w_{хт}$. Для условий, представленных на рисунке 22, наибольшая гидравлическая крупность наносов, которые дополнительно взвешиваются при промывке, составляет $u_{вп}$, а для условий рисунка 23, *а*, *б* наибольшая гидравлическая крупность взвешенных частиц $w_{(n+1)\,з}$.

Однако можно допустить, что при размыве русла взвешивание наносов до полного насыщения потока продуктами размыва произойдет в основном за счет мелких частиц и что более крупные наносы передвигаются по дну.

При этом допущении, как видно, например, из рисунка 21, *б*, значение w_{max} будет в пределах w_{xm} и $w_{xп}$ и определится из условия равенства между заштрихованной площадью в пределах крупности w_{max}, $w_{xп}$ и незаштрихованной площадью в пределах w_{xm} и w_{max} за вычетом площади донных наносов в этих же пределах.

Заштрихованную площадь правее w_{max} (рис. 21, *б*) можно записать в виде $\rho_{пв(w_{max},\ w_{xп})}$, незаштрихованная площадь левее w_{max} составляет $m\rho_{з(w_{xm},\ w_{max})} - \rho_{пв(w_{xm},\ w_{max})}$, а площадь донных наносов в пределах крупностей $w_{xm} - w_{max}$ можно выразить $c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm})$. По этим значениям указанное условие можно записать в виде:

$$\rho_{пв\,(w_{max},\ w_{xп})} = m\rho_{з\,(w_{xm},\ w_{max})} - \rho_{пв\,(w_{xm},\ w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}),$$

которое с учетом

$$\rho_{пв(w_{xm},\ w_{max})} + \rho_{пв\,(w_{max},\ w_{xп})} = \rho_{пв\,(w_{xm},\ w_{xп})},$$

можно записать в виде:

$$m\rho_{з\,(w_{xm},\ w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}) = \rho_{пв\,(w_{xm},\ w_{xп})}\ кг/м^3. \quad (184)$$

Вид уравнения для определения наибольшей гидравлической крупности взвешенных частиц наносов w_{max} зависит от значения наибольшей гидравлической крупности частиц наносов начальной мутности при промывке $w_{(n+1)п}$ и взвешивающей скорости потока при промывке $u_{вп}$.

1. При условии $u_{вп} < w_{(n+1)п}$ значение w_{max} определяют подбором по формуле (184), которую при $\rho_{пв\,(w_{xm},\ w_{xп})} = \rho_{тп(w_{xm},\ w_{xп})} - \rho_{0п\,(w_{xm},\ w_{xп})}$ можно выразить так:

$$m\rho_{з\,(w_{xm},\ w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}) = \rho_{тп\,(w_{xm},\ w_{xп})} - \rho_{0п\,(w_{xm},\ w_{xп})}, \quad (184а)$$

где $w_{xп}$ находят из уравнения (147).

Если начальная мутность при промывке $\rho_{0п} = 0$, то $w_{xп} = u_{вп}$ и

$$m\rho_{з\,(w_{xm},\ w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}) = \rho_{тп(w_{xm},\ u_{вп})}\ кг/м^3. \quad (184б)$$

2. Если $u_{вп} > w_{(n+1)п}$, то w_{max} при $\rho_{0п} > 0$ определяют по формуле:

$$m\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}) = \\ = \rho_{тп\,(w_{xm},\, u_{вп})} - \rho_{0п\,[w_{xm},\, w_{(n+1)п}]} \qquad (184в)$$

и при $\rho_{0п} = 0$ — по формуле (184б).

Возможны случаи, когда поток, поступающий на размываемый участок, полностью осветлен (например, ниже водохранилища), а состав грунта русла подчинен закономерности $j_{гр} = \frac{c_{гр}}{w} - \frac{c_{гр}}{w_{(n+1)гр}}$. Тогда при размыве русла взвешивающая скорость потока $u_{вп}$ может быть меньше или больше, чем наибольшая гидравлическая крупность частиц грунта $w_{(n+1)гр}$. При $u_{вп} < w_{(n+1)гр}$ значение наибольшей гидравлической крупности взвешенных наносов можно определить из уравнения:

$$m\rho_{гр\,(w_{xm},\, w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm}) = \\ = \rho_{тп\,(w_{xm},\, u_{вп})}\ кг/м^3. \qquad (185)$$

А если $u_{вп} > w_{(n+1)гр}$, то

$$m\rho_{гр\,(w_{1гр},\, w_{max})} - c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{1гр}) = \\ = \rho_{тп\,(w_{1гр},\, u_{вп})}\ кг/м^3, \qquad (186)$$

где $w_{1гр}$ — наименьшая гидравлическая крупность частиц грунта русла;

$c_{гр}$ — постоянная кривой распределения частиц грунта по крупности

$$c_{гр} = \frac{1}{\ln \frac{W_{(n+1)гр}}{w_{1гр}} - \frac{w_{(n+1)\,гр} - w_{1гр}}{w_{(n+1)гр}}}. \qquad (187)$$

В приведенных выше уравнениях принимают те значения m и w_{xm}, которые были найдены при расчете предельного насыщения потока (см. § 11).

Значения новых элементов, входящих в эти уравнения, составляют:

$$\rho_{гр(\,w_{xm},\, w_{max})} = c_{гр}\left(\ln \frac{w_{max}}{w_{xm}} - \frac{w_{max} - w_{xm}}{w_{(n+1)гр}}\right) кг/м^3; \qquad (188а)$$

$$\rho_{гр(\,w_{1гр},\, w_{max})} = c_{гр}\left(\ln \frac{w_{max}}{w_{1гр}} - \frac{w_{max} - w_{1гр}}{w_{(n+1)гр}}\right) кг/м^3; \qquad (188б)$$

$$\rho_{тп\,(w_{1гр},\, u_{вп})} = c_{тп}\left(\ln \frac{u_{вп}}{w_{1гр}} - \frac{u_{вп} - w_{1гр}}{u_{вп}}\right) кг/м^3. \qquad (188в)$$

Вид уравнения для определения количества наносов, осевших в отстойнике до промывки $\rho_{з(w_{xm},\, w_{max})}$, зависит от режима осаждения и величин w_{xm} и w_{max}. Ниже приведены эти уравнения; вывод их выполнен по методике, изложенной в § 5 настоящей работы.

Например, при условии осаждения наносов в отстойнике, соответствующем третьей расчетной области ($w_{Нз} < u_{вз}$) и при $w_{xm} < w_{Нз}$, а $u_{вз} < w_{max} < w_{(n+1)з}$ значение $\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})}$, можно получить как сумму (68), (70) и (71) после замены значений w_i и w_{i+1} в формуле (68) на w_{xm}, $w_{Нз}$, в (70) на $w_{Нз}$ и $u_{вз}$, а в формуле (71) на $u_{вз}$ и w_{max}. Произведя указанные замены и суммируя, мы получаем уравнение (191).

Приводим следующие формулы для определения значения $\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})}$:

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з(w_{xm},\, w_{max})} - a_{тз}\, b_{тз(w_{xm},\, w_{max})}\right] кг/м^3, \quad (189)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{Нз},\, w_{max})} - \rho_{тз(w_{Нз},\, w_{max})} + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з(w_{xm},\, w_{Нз})} - a_{тз}\, b_{тз\,(w_{xm},\, w_{Нз})}\right] кг/м^3; \quad (190)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{Нз},\, w_{max})} - \rho_{тз(w_{Нз},\, w_{max})} + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з\,(w_{xm},\, w_{Нз})} - a_{тз}\, b_{тз(w_{xm},\, w_{Нз})}\right] кг/м^3; \quad (191)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{xm},\, w_{max})} - \rho_{тз\,(w_{xm},\, w_{max})}\ кг/м^3; \quad (192)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{xm}\,,\, w_{max})} - \rho_{тз\,(w_{xm},\, u_{вз})}\ кг/м^3; \quad (193)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{xm},\, w_{max})}\ кг/м^3; \quad (194)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з\,(w_{xm},\, w_{max})} - a_{тз}\, e_{тз}\right] кг/м^3; \quad (195)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{Нз},\, w_{max})} + \frac{1}{2w_{Нз}}\left[a_{0з}\, b_{0з(w_{xm},\, w_{Нз})} - a_{тз}\, e_{тз}\right] кг/м^3; \quad (196)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \frac{1}{2w_{Нз}}\, a_{0з}\, b_{0з(w_{xm},\, w_{max})}\ кг/м^3; \quad (197)$$

$$\rho_{з\,(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{0з\,(w_{Нз},\, w_{max})} + \frac{1}{2w_{Нз}}\, a_{0з}\, b_{0з\,(w_{xm},\, w_{Нз})}\ кг/м^3. \quad (198)$$

В перечисленных формулах приняты дополнительные обозначения:

$$b_{\text{тз}\,(w_{xm},\,w_{\max})} = (w_{\max} - w_{xm})\,(2u_{\text{вз}} - w_{\max} - w_{xm}); \qquad (199а)$$

$$b_{0\text{з}\,(w_{xm},\,w_{\max})} = (w_{\max} - w_{xm})\,(2w_{(n+1)\text{з}} - w_{\max} - w_{xm}); \qquad (199б)$$

$$b_{\text{тз}\,(w_{xm},\,w_{Hз})} = (w_{Hз} - w_{xm})\,(2u_{\text{вз}} - w_{Hз} - w_{xm}). \qquad (199в)$$

Выбор формулы для определения $\rho_{\text{з}\,(w_{xm},\,w_{\max})}$ производится по таблице 18 с учетом расчетной области осаждения наносов в межпромывной период и значений w_{xm} и $w_{\max}$.

ТАБЛИЦА 18

Формулы для определения количества наносов $\rho_{\text{з}}\,(w_{xm},\,w_{\max})$

Расчетная область	w_{xm}, $w_{\max}$ в пределах	№ расчетной формулы
Третья $w_{Hз} < u_{\text{вз}}$	$w_{xm} < w_{\max} < w_{Hз}$	189
	$w_{xm} < w_{Hз} < w_{\max} < u_{\text{вз}}$	190
	$w_{xm} < w_{Hз} < u_{\text{вз}} < w_{\max}$	191
	$w_{Hз} < w_{xm} < w_{\max} < u_{\text{вз}}$	192
	$w_{Hз} < w_{xm} < u_{\text{вз}} < w_{\max}$	193
	$u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{\max}$	194
Вторая $u_{\text{вз}} < w_{Hз} < w_{(n+1)\text{з}}$	$w_{xm} < w_{\max} < u_{\text{вз}}$	189
	$w_{xm} < u_{\text{вз}} < w_{\max} < w_{Hз}$	195
	$w_{xm} < u_{\text{вз}} < w_{Hз} < w_{\max}$	196
	$u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{\max} < w_{Hз}$	197
	$u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{Hз} < w_{\max}$	198
	$w_{Hз} < w_{xm} < w_{\max}$	194
Первая $w_{Hз} > w_{(n+1)\text{з}}$	$w_{xm} < w_{\max} < u_{\text{вз}}$	189
	$w_{xm} < u_{\text{вз}} < w_{\max}$	195
	$u_{\text{вз}} < w_{xm} < w_{\max}$	197

При определении скорости насыщения потока исходили из положения, что взвешивание частиц наносов происходит под действием вертикально составляющих скоростей с величиной в пределах до $u_{\text{вп}}$. В действительности же направленные вверх поперечные скорости потока значительно больше $u_{\text{вп}}$, и они также участвуют во взвешивании наносов. Эти скорости, несмотря на малую частоту их повторения, в известной степени ускоряют

подъем частиц, поэтому насыщение потока наносами происходит на соответственно меньшем расстоянии чем то, которое получается по формуле (183). Исследования А. Г. Нацвлишвили на Баграм-Тапинском отстойнике [18] показали, что полное насыщение потока наносами при промывке происходило в среднем на расстоянии в 2 раза меньшем, чем по формуле (183). Для уточнения формул динамики насыщения потока наносами при промывке отстойников необходимы специальные исследования.

Выше был изложен метод расчета размыва наносных отложений в отстойнике при отсутствии поперечных галерей. Однако этот метод может быть применен и при расчете промывки отстойников с поперечными галереями, если в него внести соответствующие дополнения, учитывающие их работу. При помощи поперечных галерей захватывают и отводят в сторону нижние слои потока в отстойнике с донными наносами. Ниже галереи поток, освобожденный от донных наносов, размывает русло и на соответствующем расстоянии вновь насыщается донными наносами. В процессе размыва русла увеличивается количество взвешенных наносов $\rho_{пв}$ за счет мелких частиц. Таким образом, при устройстве поперечных галерей увеличивается размыв наносных отложений в отстойнике.

Если известно распределение наносов по глубине потока перед галереей и доля расхода воды, который поступает в галерею из камеры отстойника, то довольно точно можно рассчитать расход наносов в поперечной галерее. Этот расход состоит из суммы донных и придонных наносов. Причем расход донных наносов определяется как произведение донной мутности $\rho_{дп}$ на полный расход воды камеры при промывке на заданном участке, а расход придонных наносов как произведение придонной мутности на расход воды поперечной галереи. Здесь имеется в виду, что расстояние между галереями достаточно для насыщения потока донными и взвешенными наносами. При меньшем расстоянии между галереями не происходит полного насыщения потока донными и взвешенными наносами и количество отводимых галереей наносов меньше.

Если поперечные галереи расположены одна от другой на расстоянии L, где происходит полное насыщение потока донными и взвешенными наносами (183), количество донных наносов можно определить по формуле (135). В таком случае, учитывая незначительный расход воды поперечной галереи, количество отводимых взвешенных наносов без большой погрешности можно вычислять по средним значениям мутностей $\rho_{оп}$ и $\rho_{пв}$.

Расчет гидравлического смыва наносных отложений из отстойника, на котором устроены поперечные галереи, следует производить следующим образом.

На начальном участке отстойника от входа до первой галереи значения $\rho_{дп}$ и $\rho_{пв}$ определяют по методу, изложенному

в § 11. Расход наносов, которые сбрасываются в нижний бьеф через первую галерею, составляет $q_{тг_1} = \rho_{дп_1} Q_{о_1} + \rho_{пв_1} Q_{г_1}$. На втором участке между первой и второй галереями определяют тем же методом $\rho_{дп_2}$ и $\rho_{пв_2}$. Расход, который сбрасывается через вторую галерею, составляет $q_{тг_2} = \rho_{дп_2} Q_{о_2} + \rho_{пв_2} Q_{г_2}$ и т. д. По полученным значениям $q_{тг_1}$, $q_{тг_2}$ можно рассчитать и объем размытых наносов при промыве. В приведенных формулах $Q_{о_1}$ и $Q_{о_2}$ обозначают расход воды в отстойнике на соответствующих участках, а $Q_{г_1}$ и $Q_{г_2}$ — расход воды галерей.

§ 13. Критическая мутность потока в сбросном канале

Транспортирующая способность потока в сбросном канале должна быть больше или равна транспортирующей способности потока в отстойнике при промыве, чтобы не произошло заиления сбросного тракта. Но в отдельных случаях допустимо некоторое заиление сбросного канала в начальный период промывки отстойника при условии, что эти отложения нужно смывать после промыва отстойника и уменьшения мутности потока, поступающего в сбросной канал. В этих условиях взвешивающая скорость потока в сбросном канале $u_{вс}$ меньше, чем взвешивающая скорость потока в отстойнике $u_{вп}$. Отсюда и транспортирующая способность потока в сбросном канале меньше, чем в отстойнике при промыве последнего. При полном насыщении потока в отстойнике и поступлении этих наносов в сбросной канал некоторая часть наносов окажется избыточной. Количество наносов, которое 1 $м^3$ потока может транспортировать в сбросном канале, составляет критическую мутность этого потока.

Полное количество наносов, которое сбрасывается при промыве отстойника, равно мутности в конце отстойника и обозначается через $\rho_{кр_0}$. Оно состоит из наносов начальной мутности потока, поступающего из реки при промывке $\rho_{0п}$ и размытых в отстойнике наносов $m\rho_з$, приходящихся на 1 $м^3$ воды. Таким образом, величина $\rho_{кр_0}$ составляет:

$$\rho_{кр_0} = \rho_{0п} + m\rho_з. \qquad (200)$$

Если транспортирующая способность потока в сбросном канале меньше, чем в отстойнике, то $u_{вс} < u_{вп}$ и $u_{дс} < u_{дп}$, где $u_{дп}$, $u_{дс}$ — значения наибольшей гидравлической крупности частиц донных наносов в отстойнике ($u_{дп}$) и в сбросном канале ($u_{дс}$). В этих условиях в потоке образуется избыток наносов, которые осаждаются в сбросном канале.

Обозначив избыточное количество наносов через $\rho_{ис}$, а количество наносов, транспортирующихся без осаждения $\rho_{кр.с}$, можно написать:

$$\rho_{кр.с} = \rho_{кр_0} - \rho_{ис} = \rho_{0п} + m\rho_з - \rho_{ис}. \qquad (201)$$

Значение избыточной мутности в сбросном канале $\rho_{ис}$ зависит от количества и состава поступающих в него наносов, от величин предельной гидравлической крупности начальной мутности при осаждении в отстойнике $(w_{(n+1)з})$ и при промывке $(w_{(n+1)п})$, от размеров взвешивающих скоростей в отстойнике $(u_{вп})$ и в сбросном канале $(u_{вс})$, наибольших крупностей частиц донных наносов $(u_{дп})$ и $(u_{дс})$, осаждения наносов в отстойнике и других условий.

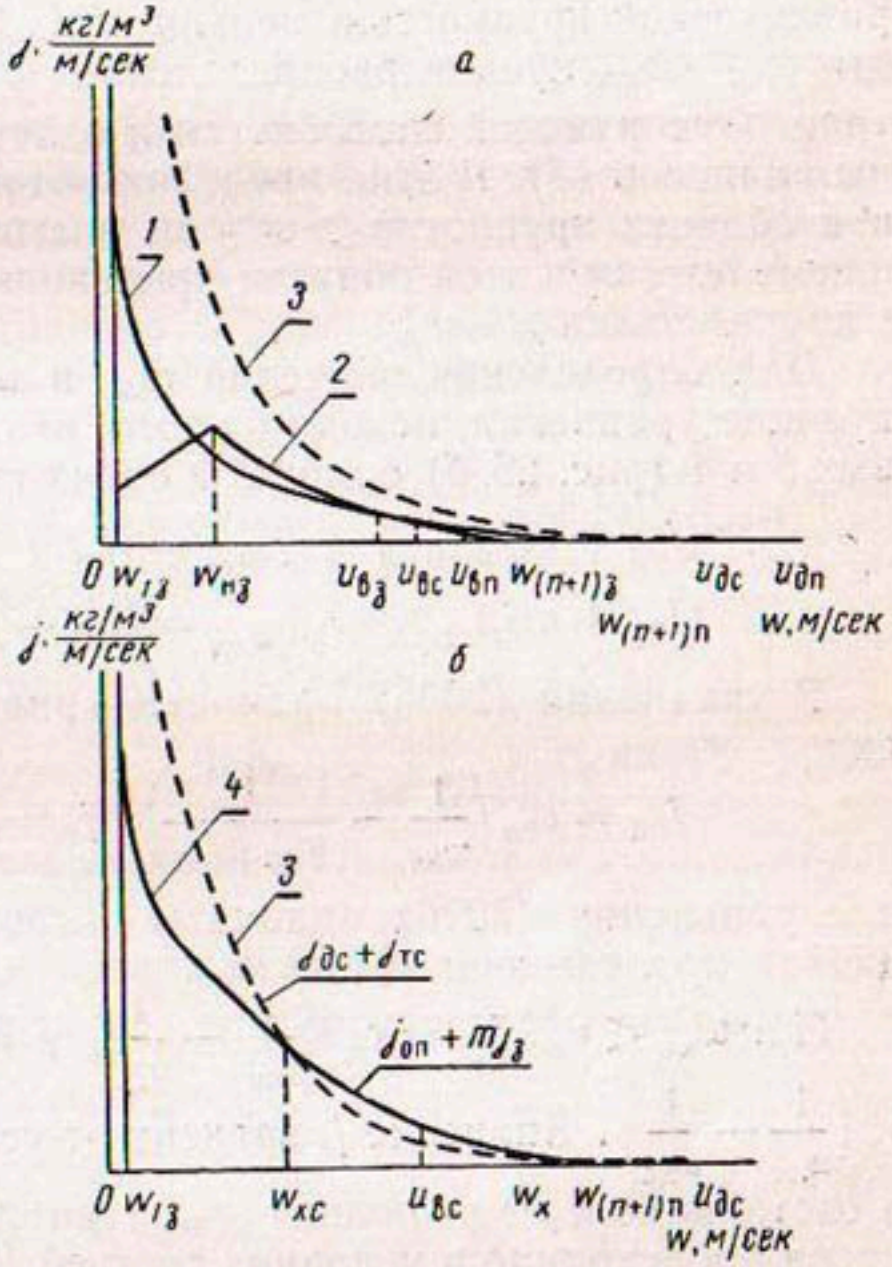


Рис. 25. Кривые распределения наносов по крупности:
$1 - j_{0п} = f(w)$; $2 - mj_з = f(w)$; $3 - j = j_{тс} + j_{дс} = f(w)$; $4 - j_{кр.о} = j_{оп} + mj_з = f(w)$.

На рисунке 25, *а* приведены кривые распределения наносов начальной мутности при промывке $\rho_{оп}$ (1), с уравнением кривой $j_{0п} = c_{6п}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)п}}\right)$, размытых при промывке наносов $m\rho_з$ (2) и кривая (3) распределения донных и взвешенных наносов, подсчитанных по транспортирующей способности потока с уравнением $j = j_{тс} + j_{дс}$. По этим данным (рис. 25, *б*) построена кривая (4), ордината которой составляет $j_{кр_0} = j_{оп} + mj_з$. Сюда же перенесена кривая распределения донных и взвешенных наносов (3).

График составлен при условии осаждения наносов в отстойнике за период до промывки для третьей расчетной области $w_{нз} < u_{вз}$ при $u_{вз} < u_{вс} < u_{вп}$ и $u_{вп} < w_{(n+1)з} < w_{(n+1)п}$.

Наложение на графике кривых *3* и *4* (рис. 25, *б*) позволяет составить представление о характере насыщения потока наноса-

ми в сбросном канале и распределения по крупности избытка наносов.

При промывке отстойника поток воды в нем обычно не насыщается мелкими наносами. Вследствие этого в сбросном канале поток также не будет насыщен мелкими частицами, несмотря на избыток крупных наносов. На рисунке 25 графически изображен такой случай. Поток не насыщен частицами наносов с гидравлической крупностью меньше w_{xc}. Далее в пределах крупности w_{xc}—$w_{xд}$ кривая распределения $\rho_{кр}$, проходит выше кривой транспортирующей способности в отношении донных и взвешенных наносов (*3*). В этих пределах поток перенасыщен наносами, а в области крупности $>w_{xд}$ он насыщен не полностью. Насыщение потока в этой области происходит за счет избытка частиц с крупностью w_{xc}—$w_{д}$.

Для определения значений w_{xc} и $w_{xд}$ можно составить следующие уравнения, исходя из того, что в точке пересечения кривых *3* и *4* (рис. 25, *б*) ординаты обеих кривых равны:

$$(j_{0п} + mj_з)_{\text{ при } w = w_{xc}} = (j_{тс} + j_{дс})_{\text{ при } w = w_{xc}} \qquad (202а)$$

$$(j_{0п} + mj_з)_{\text{ при } w = w_{xд}} = (j_{тс} + j_{дс})_{\text{ при } w = w_{xд}}. \qquad (202б)$$

В уравнении (202а) ординаты кривых распределения имеют вид:

$$j_{0п} = c_{0п}\left(\frac{1}{w_{xc}} - \frac{1}{w_{(n+1)п}}\right);\ j_{тс} = c_{тс}\left(\frac{1}{w_{xc}} - \frac{1}{u_{вс}}\right),$$

а в уравнении (202б) ординаты выражены так же, как и в (202а), но с заменой w_{xc} на $w_{xд}$.

При $w_{xc} < u_{вс}$ $j_{дс} = c_{дс}\left(\frac{1}{u_{вс}} - \frac{1}{u_{дв}}\right)$ и при $w_{xc} > u_{вс}$ $j_{дс} = c_{дс} \times \left(\frac{1}{w_{xc}} - \frac{1}{u_{дс}}\right)$. Значение $j_з$ зависит от условий осаждения наносов в отстойнике и от величины w_{xc}. Например, если осаждение наносов происходило в условиях третьей расчетной области ($w_{нз} < u_{вз}$, рис. 25), то при значении w_{xc} в пределах крупности $w_{нз}$—$u_{вз}$ ордината $j_з$ определяется по уравнению (66б), а $j_{дс}$ по формуле (111). При указанных значениях ординат кривых распределений уравнений (202а) можно переписать в виде:

$$c_{0п}\left(\frac{1}{w_{xc}} - \frac{1}{w_{(n+1)п}}\right) + \frac{m}{w_{xc}} + \frac{m}{w_{xc}}(c_{0з} - c_{тз}) + m(a_{0з} - a_{тз}) = c_{гс}\left(\frac{1}{w_{xc}} - \frac{1}{u_{вс}}\right) + c_{дс}\left(\frac{1}{u_{вс}} - \frac{1}{u_{дс}}\right),$$

откуда можно получить:

$$w_{xc} = \frac{c_{0п} + m(c_{0з} + c_{тз}) - c_{тс}}{a_{0п} + m(a_{0з} - a_{тз}) - a_{тс} - a_{дс} + \frac{c_{дс}}{u_{вс}}} \text{ м/сек.} \qquad (203)$$

В формуле (203) приняты дополнительные обозначения:

$$a_{тс} = \frac{c_{тс}}{u_{вс}}, \qquad (203а)$$

$$a_{дс} = \frac{c_{дс}}{u_{дс}}. \qquad (203б)$$

Таким же образом получают уравнения для определения значения $w_{хс}$ и $w_{хд}$ для других условий.

Площадь, заключенную между кривыми (*3*) и (*4*) в пределах крупности частиц $w_{хс}$ и $w_{хд}$ (рис. 25, *б*), обозначим через ω_1, а площадь недостающих наносов крупнее $w_{хд}$ — через ω_2. Первую из этих площадей (ω_1) можно найти, если в пределах крупности $w_{хс}$ и $w_{хд}$ из величины начальной мутности в сбросном канале $\rho_{кр0}$ вычесть величину транспортирующей способности потока:

$$\omega_1 = \left[m\rho_{з(w_{хс}\,,\,w_{хд})} + \rho_{0п\,(w_{хс},\,w_{хд})}\right] - \left[\rho_{дс\,(w_{хс}\,,\,w_{хд})} + \rho_{тс\,(w_{хс},\,w_{хд})}\right] кг/м^3.$$

А площадь ω_2 можно выразить так:

$$\omega_2 = \left[\rho_{дс\,(w_{хд},\,u_{дс})} + \rho_{тс\,(w_{хд},\,u_{вс})}\right] - \left[m\rho_{з\,[w_{хд},\,w_{(n+1)з}]} + \rho_{0п\,[w_{хд},\,w_{(n+1)п}]}\right] кг/м^3. \qquad (204б)$$

Очевидно, значение избыточной мутности в сбросном канале составит:

$$\rho_{ис} = \omega_1 - \omega_2 \; кг/м^3. \qquad (205)$$

Подставляя значения ω_1 и ω_2 в формулу (205), получим:

$$\rho_{ис} = \left[m\rho_{з\,[w_{хс},\,w_{(n+1)\,з}]} + \rho_{0п\,[w_{хс},\,w_{(n+1)п}]}\right] - \left[\rho_{дс\,(w_{хс},\,u_{дс})} + \rho_{тс\,(w_{хс},\,u_{вс})}\right] кг/м^3. \qquad (205а)$$

Уравнение критической мутности потока в сбросном канале при промыве отстойника можно получить из формулы (201), подставив в нее значение $\rho_{ис}$ из формулы (205а). Учитывая что

$$m\rho_з - m\rho_{з\,[w_{хс},\,w_{(n+1)з}]} = m\rho_{з\,(w_{min\,з},\,w_{хс})}$$

и

$$\rho_{0п} - \rho_{0п\,[w_{хс},\,w_{(n+1)п}]} = \rho_{0п\,(w_{1п},\,w_{хс})},$$

после преобразований получаем следующую формулу для определения величины критической мутности:

$$\rho_{крс} = \rho_{0п\,(w_{1п},\,w_{хс})} + m\rho_{з(w_{min\,з},\,w_{хс})} + \rho_{дс\,(w_{хс},\,u_{дс})} + \rho_{тс\,(w_{хс},\,u_{вс})} \; кг/м^3. \qquad (206)$$

В уравнении (206) обозначения определяются:

$$\rho_{0п\,(w_{1п},\,w_{хс})} = c_{0п}\left(\ln\frac{w_{хс}}{w_{1п}} - \frac{w_{хс}-w_{1п}}{w_{(n+1)п}}\right) кг/м^3, \qquad (206а)$$

$$\rho_{тс\,(w_{хс},\,u_{вс})} = c_{тс}\left(\ln\frac{u_{вс}}{w_{хс}} - \frac{u_{вс}-w_{хс}}{u_{вс}}\right) кг/м^3, \qquad (206б)$$

$$\rho_{дс\,(w_{хс},\,u_{дс})} = c_{дс}\left[\ln\frac{u_{дс}}{u_{вс}} - \left(\frac{1}{u_{вс}} - \frac{1}{u_{дс}}\right)w_{хс}\right] \text{ при } w_{хс} < u_{вс}\ кг/м^3, \qquad (206в)$$

$$\rho_{дс\,(w_{хс},\,u_{дс})} = c_{дс}\left(\ln\frac{u_{дс}}{w_{хс}} - \frac{u_{дс}-w_{хс}}{u_{дс}}\right) \text{ при } w_{хс} > u_{вс}\ кг/м^3. \qquad (206г)$$

Значение $m\rho_з$ находят по способу, изложенному в § 11 настоящей работы.

Уравнение (206) позволяет рассчитать количество наносов, которое поток в сбросном канале способен транспортировать по дну и во взвешенном состоянии с учетом гранулометрического состава начальной мутности.

Мутность $\rho_{крс}$ в сбросном канале установится на достаточной длине после осаждения всех частиц наносов избыточной мутности $\rho_{ис}$. Предельная длина сбросного канала, на которой осаждаются все частицы $\rho_{ис}$, равна:

$$L_{пр.с} = \frac{vH}{w_{хс}}\ м, \qquad (207)$$

где v и H — скорость и глубина потока в сбросном канале.

Таким образом, при длине сбросного канала, равной или большей $L_{пр}$, все частицы избытка наносов выпадают на дно и мутность в конце его ($\rho_{кр.с}$) определяется по формуле (207).

Для этого случая сбросной канал рассчитывают на осаждение полного количества избытка наносов $\rho_{ис}$ (205а).

Если же сбросной канал имеет длину $L_с < L_{пр.с}$, то часть избытка наносов (преимущественно мелкие частицы) не осаждается в нем и мутность в конце сбросного канала $\rho_{вс}$ больше $\rho_{крс}$. В этом случае, чтобы найти мутность $\rho_{вс}$ и количество осевших в сбросном канале наносов $\rho_{кр_0} - \rho_{вс}$, расчет осаждения нужно вести, как в отстойнике, по методу, изложенному в § 4.

При выводе формул для расчета заиления сбросного канала было допущено, что длина отстойника при промывке достаточна для полного насыщения потока наносами, т. е. если длина отстойника L_0, то $L_0 \geqslant L$, где L определяется по формуле (183). При малой же длине отстойника ($L_0 < L$) мутность потока в конце отстойника не достигает предела насыщения, что нужно принимать во внимание, рассчитывая сбросный тракт.

§ 14. Упрощенные формулы по расчету насыщения потока наносами и пределы их применения

Изложенные методы расчета транспортирующей способности потока, осаждения наносов в отстойнике и промывки его основаны на закономерности в распределении по крупности насыщающих поток наносов. При этом расчетные зависимости справедливы для любых значений предельных гидравлических крупностей частиц. Расчеты показывают, что приведенные формулы без большой погрешности можно значительно упростить, если исключить из них элементы, которые по сравнению с другими имеют весьма малое значение.

Обычно значение w_1 в десятки и сотни раз меньше $w_{(n+1)з}$ и $u_{вз}$. Поэтому в уравнениях (50), (51), (56), (57) и других можно опустить члены $\frac{w_{1з}}{w_{(n+1)з}}$, $\frac{w_{1з}}{u_{вз}}$; тогда они примут вид:

$$w_{mз} = 0{,}005 c_{0з} + w_{1з}; \tag{208а}$$

$$c_{0з} = \frac{\rho_{0з}}{\ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} - 1}, \tag{208б}$$

$$\rho_{0з} = c_{0з}\left(\ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} - 1\right); \tag{208в}$$

$$\rho_{тз} = c_{тз}\left(\ln \frac{u_{вз}}{w_{1з}} - 1\right). \tag{208г}$$

Если в упрощенных формулах $\frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} = 20$ или $\frac{u_{вз}}{w_{1з}} = 20$, то ошибка при определении значений $\rho_{0з}$ или $\rho_{тз}$ составляет всего 2,5%. Если же $\frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} = 100$ или $\frac{u_{вз}}{w_{1з}} = 100$, ошибка сокращается до 0,3%. Для условий Аму-Дарьи при $w_1 = 0{,}04$ *мм/сек* и $w_{(n+1)} = 12{,}0$ *мм/сек* погрешность от упрощения формулы составляет всего лишь 0,07%. Подсчеты показывают, что упрощать формулы для определения $\rho_{тз}$, $\rho_{0з}$ можно при $w_{(n+1)з} : w_{1з} \geqslant 15$ и $u_{вз} : w_{1з} \geqslant 15$, когда наибольшее искажение результатов составит 4,0%. Формулы по определению начальной мутности $\rho_{0п}$ и транспортирующей способности потока при промывке $\rho_{тп}$ тоже можно упростить, если $w_{(n+1)п} : w_{1п} \geqslant 15$ и $u_{вп} : w_{1п} \geqslant 15$

$$\rho_{0п} = c_{0п}\left(\ln \frac{w_{(n+1)п}}{w_{1п}} - 1\right), \tag{209}$$

$$\rho_{тп} = c_{тп}\left(\ln \frac{u_{вп}}{w_{1п}} - 1\right). \tag{210}$$

Значительно упрощаются и формулы по расчету количества осевших в отстойнике наносов (72, 78, 80), если из них удалить все члены с множителем w_{min}.

При осаждении наносов в условиях первой расчетной области ($w_{Нз} > w_{(n+1)з}$)

$$\rho_{зI} = \frac{1}{2w_{Нз}} \left(c_{0з} w_{(n+1)з} - c_{тз} u_{вз} \right) кг/м^3; \qquad (211а)$$

в условиях второй расчетной области ($u_{вз} < w_{Нз} < w_{(n+1)з}$)

$$\rho_{зII} = c_{0з} \ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{Нз}} + c_{0з} \frac{w_{Нз}}{2w_{(n+1)з}} - c_{тз} \frac{u_{вз}}{2w_{Нз}} кг/м^3 \qquad (211б)$$

и при осаждении в условиях третьей расчетной области ($w_{minз} < w_{Нз} < u_{вз}$).

$$\rho_{зIII} = c_{0з} \ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{Нз}} - c_{тз} \ln \frac{u_{тз}}{w_{Нз}} + \\ + \frac{w_{Нз}}{2} \left(\frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} - \frac{c_{тз}}{u_{вз}} \right) кг/м^3. \qquad (211в)$$

Подсчеты показывают, что при $w_{(n+1)з} \geqslant 40 w_{minз}$ и $w_{Нз} \geqslant 8 w_{minз}$ искажения в количествах осевших в отстойнике наносов в межпромывной период, вычисленные по формулам (211 *a—b*), не превышают 11,8%. Обычно отношения $w_{(n+1)з} : w_{minз}$ и $w_{Нз} : w_{minз}$ значительно больше указанных величин. Поэтому ошибки в вычислениях по сокращенным формулам незначительны. Например, при расчете отстойников на Аму-Дарьинских оросительных системах со скоростью течения 0,3 *м/сек*, глубиной воды 2,5 *м* длиной отстойника 1000 *м*, $w_{(n+1)з} = 11$ *мм/сек*, $w_{1з} = 0{,}0475$ *мм/сек* и начальной мутностью $\rho_{оз} = 6{,}0$ *кг/м*^{3} количество осевших в отстойнике наносов по сокращенной формуле составляет 3,57 *кг/м*^{3}, а по полной формуле 3,51 *кг/м*^{3}, т. е. искажение всего 1,7%.

Поэтому при условии $w_{(n+1)з} \geqslant 40 w_{minз}$, $w_{Нз} \geqslant 8 w_{minз}$ и осветлении потока в отстойнике до 60% для вычисления количества осевших в отстойнике наносов в межпромывной период $\rho_з$ можно рекомендовать формулы (211 *a—b*) вместо 72, 78 и 80, что существенно упрощает расчет.

Таким же образом несколько упрощаются формулы по расчету $\rho_{з(w_{minз} \cdot w_{xm})}$. Если $w_{(n+1)з} : w_{minз} \geqslant 40$, $w_{Нз} : w_{minз} \geqslant 8$ и $w_{xm} : w_{minз} \geqslant 20$, наибольшая погрешность при сокращении формул составит 8,9%. Для этих условий количество осевших из 1 *м*^{3} воды наносов в межпромывной период с крупностью частиц в пределах $w_{minз}$—w_{xm} определяют по следующим сокращенным формулам.

1. Отстаивание наносов в условиях первой расчетной области ($w_{Нз} > w_{(n+1)з}$):

а) при $w_{minз} < w_{xm} < u_{вз}$ взамен полной формулы (163)

$$\rho_{з(w_{minз},\, w_{xm})} = \frac{w_{xm}}{w_{Нз}}\left[c_{0з}\left(1 - \frac{w_{xm}}{2w_{(n+1)з}}\right) - c_{тз}\left(1 - \frac{w_{xm}}{2u_{вз}}\right)\right] кг/м^3, \quad (212а)$$

б) при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$ взамен полной формулы (170)

$$\rho_{з(w_{min\,з},\, w_{xm})} = c_{0з}\frac{w_{xm}}{w_{Нз}}\left(1 - \frac{w_{xm}}{2w_{(n+1)з}}\right) - c_{тз}\frac{u_{вз}}{2w_{Нз}} кг/м^3. \quad (212б)$$

2. Отстаивание наносов в условиях второй расчетной области ($u_{вз} < w_{Нз} < w_{(n+1)з}$):

а) при $w_{minз} < w_{xm} < u_{вз}$ взамен (163) по формуле (212 а);

б) при $u_{вз} < w_{xm} < w_{Нз}$ взамен (170) по формуле (212 б);

в) при $w_{Нз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$ взамен (171) по формуле:

$$\rho_{з\,(w_{min\,з},\, w_{xm})} = c_{0з}\ln\frac{w_{xm}}{w_{Нз}} + c_{0з}\left(1 + \frac{w_{Нз}}{2w_{(n+1)з}} - \frac{w_{xm}}{w_{(n+1)з}}\right) - c_{тз}\frac{u_{вз}}{2w_{Нз}} кг/м^3. \quad (213)$$

3. Отстаивание наносов в условиях третьей расчетной области ($w_{minз} < w_{Нз} < u_{вз}$):

а) при $w_{minз} < w_{xm} < w_{Нз}$ взамен (163) по формуле (212 а);

б) при $w_{Нз} < w_{xm} < u_{вз}$ взамен (164) по формуле:

$$\rho_{з(w_{min\,з},\, w_{xm})} = c_{0з}\ln\frac{w_{xm}}{w_{Нз}} - c_{тз}\ln\frac{u_{вз}}{w_{Нз}} + c_{0з}\left(1 - \frac{w_{xm}}{w_{(n+1)з}} + \frac{w_{Нз}}{2w_{(n+1)з}}\right) - c_{тз}\left(1 - \frac{w_{xm}}{u_{вз}} + \frac{w_{Нз}}{2u_{вз}}\right) кг/м^3; \quad (214а)$$

в) при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$ взамен (165) по формуле:

$$\rho_{з(w_{min\,з},\, w_{xm})} = \left[c_{0з}\left(1 - \frac{w_{xm}}{2w_{(n+1)з}}\right) - c_{тз}\left(1 - \frac{w_{xm}}{2u_{вз}}\right)\right]\frac{w_{xm}}{w_{Нз}} кг/м^3. \quad (214б)$$

А. Г. Нацвлишвили на основании своих исследований отстойника Баграм-Тапинского гидроузла пришел к выводу, что при сравнительно небольшом осветлении потока в межпромывные периоды и осаждении наносов в условиях первой и второй расчетных областей ($w_{Нз} > w_{(n+1)з}$ и $w_{(n+1)з} > w_{Нз} > u_{вз}$) распределение по

крупности осевших в отстойнике наносов без большой погрешности можно принять по линейному закону. При $w_{(n+1)з} \geqslant 7u_{вз}$ и осаждении наносов в условиях первой расчетной области или $w_{(n+1)з} \geqslant 3{,}5w_{нз}$ — при осаждении в условиях второй расчетной области неточность вычислений составляет 10%.

При указанном допущении полное количество осевших из 1 $м^3$ воды наносов выражается площадью треугольника с наибольшей ординатой распределения по крупности $j_{з\max}$, если $(w = w_{\min з})$:

$$j_{з\max} = \frac{2\rho_{з[\,w_{\min з},\, w_{(n+1)з}\,]}}{w_{(n+1)з} - w_{\min з}} \frac{кг/м^3}{м/сек}, \tag{215}$$

где $\rho_{з\,[\,w_{\min з},\, w_{(n+1)з}\,]} = \rho_з$ — полное количество осевших в отстойнике наносов определяется по одной из формул (72, 78, 80) или (211 *a*—*b*).

Формулу для определения ординаты распределения при любом значении w в пределах $w_{\min з}$ и $w_{(n+1)з}$ можно записать в виде:

$$j_з = 2\rho_з \frac{w_{(n+1)з} - w}{(w_{(n+1)з} - w_{\min з})^2} \frac{кг/м^3}{м/сек}, \tag{216}$$

а количество наносов с крупностью более w

$$\rho_{з[w,\, w_{(n+1)з}\,]} = \rho_з \left(\frac{w_{(n+1)з} - w}{w_{(n+1)з} - w_{\min з}} \right)^2 кг/м^3. \tag{217}$$

Уравнения (216) и (217) облегчают расчет насыщения потока наносами при промывке отстойников для определения значений w_{xm} и m по формулам (148, 150).

Если $w = w_{xm}$, на основании (216) и (217) можно написать:

$$j_{з(w=w_{xm})} = 2\rho_з \frac{w_{(n+1)з} - w_{xm}}{(w_{(n+1)з} - w_{\min з})^2} \frac{кг/м^3}{м/сек} \tag{218}$$

и

$$\rho_{з[\,w_{xm},\, w_{(n+1)з}\,]} = \rho_з \left(\frac{w_{(n+1)з} - w_{xm}}{w_{(n+1)з} - w_{\min з}} \right)^2 кг/м^3. \tag{219}$$

В этом случае для вычисления w_{xm} и m по уравнениям (148, 150) значения $j_{з\,(w=w_{xm})}$ и $\rho_{з\,[\,w_{xm},\, w_{(n+1)з}\,]}$, определяют по формулам (218 и 219), что значительно сокращает расчет.

Линейное распределение по крупности осевших наносов, которые подвергаются размыву при промывке, облегчает и расчет динамики насыщения потока по длине отстойника. Здесь существенно упрощается подбор значения наибольшей гидравлической крупности частиц насыщающих поток наносов $w_{\max}$, изложенный в § 12 настоящей работы.

Общее уравнение (184) для определения w_{max} можно переписать в виде:

$$m\rho_{з(w_{xm},\, w_{max})} - \rho_{д(w_{xm},\, w_{max})} = \rho_{пв(>w_{xm})}\ кг/м^3. \qquad (220)$$

Значение $\rho_{пв(>w_{xm})}$ составляет: при $w_{(n+1)п} > u_{вп}$

$$\rho_{пв(>w_{xm})} = \rho_{тп(w_{xm},\, w_{хп})} - \rho_{оп(w_{xm},\, w_{хп})}\ кг/м^3 \qquad (221а)$$

и при $w_{(n+1)п} < u_{вп}$

$$\rho_{пв(>w_{xm})} = \rho_{тп(w_{xm},\, u_{вп})} - \rho_{0п[w_{xm},\, w_{(n+1)п}]}\ кг/м^3 \qquad (221б)$$

Количество донных наносов равно:

$$\rho_{дп(w_{xm},\, w_{max})} = c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{xm})\ кг/м^3. \qquad (222)$$

Количество размытых наносов с крупностью в пределах w_{xm}—w_{max} выражаются:

$$m\rho_{з(w_{xm},\, w_{max})} = m\rho_з \frac{b_{0з(w_{xm},\, w_{max})}}{d_{0з}}\ кг/м^3, \qquad (223)$$

где $b_{0з(w_{xm},\, w_{max})}$ и $d_{0з}$ определяют по формулам (199б) и (175а).

После подстановки значений из (221—223) в (220) получается уравнение для подбора w_{max} при $w_{(n+1)п} > u_{вп}$:

$$m\rho_з \frac{b_{0з(w_{xm},\, w_{max})}}{d_{0з}} - (w_{max} - w_{xm})c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right) = \rho_{тп(w_{xm},\, w_{хп})} - \rho_{оп(w_{xm},\, w_{хп})}\ кг/м^3, \qquad (224а)$$

а при $w_{(n+1)п} < u_{вп}$

$$m\rho_з \frac{b_{0з(w_{xm},\, w_{max})}}{d_{0з}} - (w_{max} - w_{xm})\, c_{дп}\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right) = \rho_{тп(w_{xm},\, u_{вп})} - \rho_{оп[w_{xm},\, w_{(n+1)п}]}\ кг/м^3. \qquad (224б)$$

§ 15. Пример расчета и сопоставление расчетных и измеренных величин

В качестве примера приведен расчет гидравлического промыва отстойника для условий, когда наибольшая взвешивающая скорость потока при промывке $u_{вп}$ меньше значений наибольших крупностей начальной мутности в период осаждения $w_{(n+1)з}$ и промыва отстойника $w_{(n+1)п}$.

Расчет сделан для следующих исходных данных. Длина отстойника $L=890$ *м*, глубина воды при отстаивании наносов

$H_з = 2{,}5$ *м*, скорость течения $v_з = 0{,}71$ *м/сек*, гидравлический уклон $i_з = 0{,}000075$, начальная мутность $\rho_{оз} = 4{,}0$ *кг/м*^{3}, наименьшая крупность частиц наносов $w_{1з} = 0{,}04$ *мм/сек* и наибольшая — $w_{(n+1)з} = 16$ *мм/сек*.

При промыве отстойника начальная мутность $\rho_{оп} = 3{,}0$ *кг/м*, наименьшая гидравлическая крупность частиц $w_{1п} = 0{,}04$ *мм/сек* и наибольшая — $w_{(n+1)п} = 18{,}0$ *мм/сек*, скорость потока в отстойнике $v_п = 1{,}43$ *м/сек*, глубина воды $H_п = 1{,}5$ *м*, гидравлический уклон $i_п = 0{,}0006$.

В сбросном канале (длина его 2000 *м*) при промыве глубина воды равна $H_с = 2{,}0$ *м*, скорость течения $v_с = 1{,}14$ *м/сек*, уклон свободной поверхности $i_с = 0{,}00026$.

В соответствии с приведенными исходными данными постоянная кривой распределения начальной мутности при отстаивании наносов составляет:

$$c_{0з} = \frac{\rho_{оз}}{\ln \frac{w_{(n+1)з}}{w_{1з}} - \frac{w_{(n+1)з} - w_{1з}}{w_{(n+1)з}}} = \frac{4{,}0}{\ln \frac{16{,}0}{0{,}04} - \frac{16{,}0 - 0{,}04}{16{,}0}} = 0{,}8\ кг/м^3.$$

Наибольшая гидравлическая крупность избытка наносов при выходе из отстойника:

$$w_{Hз} = \frac{v_з H_з}{L} = \frac{0{,}71 \cdot 2{,}5}{890} = 0{,}002\ м/сек = 2{,}0\ мм/сек.$$

Предельная гидравлическая крупность $w_{mз}$ в соответствии с (50) равна:

$$w_{mз} = 0{,}005 c_{0з} \frac{w_{(n+1)з} - w_{1з}}{w_{(n+1)з}} + w_{1з} = 0{,}005 - 0{,}8 \frac{0{,}016 - 0{,}00004}{0{,}016} + 0{,}00004 = 0{,}00402\ м/сек = 4{,}02\ мм/сек.$$

Величина взвешивающей скорости потока в отстойнике при отстаивании:

$$u_{вз} = 0{,}065 (v_з - 0{,}05) i^{1/4} = 0{,}065 (0{,}71 - 0{,}05) 0{,}000075^{1/4} = 0{,}004\ м/сек = 4{,}0\ мм/сек.$$

Так как $w_{mз} > u_{вз}$, то наименьшая гидравлическая крупность избытка наносов и отложений в отстойнике будет $w_{1з}$.

Постоянная кривой распределения наносов по транспортирующей способности потока при отстаивании равна:

$$c_{тз} = 200\ u_{вз} = 200 \cdot 0{,}004 = 0{,}8\ кг/м^3.$$

Количество наносов, которое осаждается в отстойнике из 1 $м^3$ воды, для условий третьей расчетной области ($w_{Нз} < u_{вз}$), определяется по формуле (72).

$$\rho_{0з[w_{Нз},\, w_{(n+1)з}]} = c_{0з}\left(\ln\frac{w_{(n+1)з}}{w_{Нз}} - \frac{w_{(n+1)з} - w_{Нз}}{w_{(n+1)з}}\right) =$$

$$= 0{,}8\left(\ln\frac{16{,}0}{2{,}0} - \frac{16{,}0-2{,}0}{16{,}0}\right) = 0{,}96\ кг/м^3.$$

$$\rho_{тз(w_{Нз},\, u_{вз})} = c_{тз}\left(\ln\frac{u_{вз}}{w_{Нз}} - \frac{u_{вз} - w_{Нз}}{u_{вз}}\right) =$$

$$= 0{,}8\left(\ln\frac{4{,}0}{2{,}0} - \frac{4{,}0-2{,}0}{4{,}0}\right) = 0{,}154\ кг/м^3,$$

$$a_{0з} = \frac{0{,}8}{0{,}016} = 50;$$

$$b_{0з(w_{1з},\, w_{Нз})} = (2{,}0 - 0{,}04)\,(2\cdot 16 - 2{,}0 - 0{,}04)\,10^{-6} = 58{,}6\cdot 10^{-6};$$

$$a_{0з}\, b_{0з(w_{1з},\, w_{Нз})} = 58{,}6\cdot 50\cdot 10^{-6} = 2\cdot 96\cdot 10^{-3};$$

$$a_{тз} = 200;$$

$$b_{тз(w_{1з},\, w_{Нз})} = (2{,}0 - 0{,}04)\,(2{,}0\cdot 4 - 2{,}0 - 0{,}04)\cdot 10^{-6} = 11{,}7\cdot 10^{-6};$$

$$a_{тз}\, b_{тз(w_{1з},\, w_{Нз})} = 200\cdot 11{,}7\cdot 10^{-6} = 2{,}34\cdot 10^{-3}.$$

После подстановки этих значений в (72) получается:

$$\rho_з = 0{,}963 - 0{,}154 + \frac{2{,}96 - 2{,}34}{2\cdot 2} = 0{,}96.$$

Таким образом, коэффициент уменьшения мутности в отстойнике при отстаивании наносов равен:

$$k_y = \frac{0{,}96}{4{,}0} = 0{,}24,$$

т. е. осветление потока составляет 24%.

При промыве отстойника значение постоянной кривой распределения начальной мутности будет:

$$c_{0п} = \frac{3{,}0}{\ln\dfrac{18{,}0}{0{,}04} - \dfrac{18{,}0-0{,}04}{18{,}0}} = 0{,}59\ кг/м^3,$$

взвешивающая скорость потока в отстойнике:

$$u_{вп} = 0{,}065\,(1{,}43 - 0{,}05)\cdot 0{,}0006^{1/4} = 0{,}014\ м/сек = 14{,}0\ мм/сек,$$

постоянная кривой распределения:

$$c_{гп} = 200\cdot 0{,}014 = 2{,}8\ кг/м^3.$$

Так как $u_{вп} < w_{(n+1)п}$, часть наносов начальной мутности, состоящих из крупных частиц, опускается вниз и транспортируется по дну и в придонном слое потока.

По заданным гидравлическим элементам потока определяем (128 а) наибольший диаметр d_{max} и гидравлическую крупность частиц донных наносов $u_{дп}$.

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053v_п^2 .$$

После решения уравнения $d_{max}=11{,}6$ *мм*, чему соответствует гидравлическая крупность $u_{дп}=459$ *мм/сек*.

Чтобы определить количество размытых наносов по формулам (148) и (150), нужно знать вычисленный коэффициент m к весу осевших в отстойнике (из 1 $м^3$ воды) наносов $\rho_з[w_{1з}, w_{(n+1)з}]$, которые необходимо подавать в поток для насыщения его. Как говорилось выше, задача заключается в том, чтобы найти значение гидравлической крупности w_{xm}, при котором решение уравнений (148) и (150) дает один и тот же результат. Если решение уравнения (148) дает результат m_1, а уравнение (150) — m_2, следует подобрать такое значение w_{xm}, при котором $m_1=m_2$.

На основании (148) можно написать:

$$m_1 = \left|\frac{j_{тп}-j_{оп}}{j_з}\right| \text{ при } w = w_{xm}.$$

В этой формуле значение:

$$j_{тп} = c_{тп}\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{u_{вп}}\right) = 2{,}8\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{0{,}014}\right),$$

а

$$j_{оп} = c_{оп}\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{w_{(n+1)п}}\right) = 0{,}59\left(\frac{1}{w_{xm}} - \frac{1}{0{,}018}\right).$$

Разность $j_{тп}-j_{оп}$ составляет $j_{тп}-j_{оп}=\frac{2{,}21}{w_{xm}}-167{,}0$.

Уравнение для определения значения $j_з$ меняется в зависимости от условий осаждения наносов в отстойнике и значения w_{xm}. В данном примере $w_{Нз}=2{,}0$ *мм/сек* и $u_{вз}=4{,}0$ *мм/сек*, т. е. $w_{Нз}<u_{вз}$. Следовательно, осаждение наносов в отстойнике в межпромывной период происходило в условиях третьей расчетной области. В соответствии с этим значение $j_з$ при $w_{1з}<w_{xm}<w_{нз}$ определяется по формуле (66 а) и составляет:

$$j_з = (c_{0з}-c_{тз})\frac{1}{w_{Нз}} + \left|\frac{c_{тз}}{u_{вз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}}\right|\frac{w_{xm}}{w_{Нз}} =$$

$$= \left[\frac{0{,}8}{0{,}004} - \frac{0{,}8}{0{,}016}\right]\frac{w_{xm}}{0{,}002} = 75000\,w_{xm}$$

при $w_{Нз}<w_{xm}<u_{вз}$ по формуле (66 б):

$$j_з = (c_{0з}-c_{тз})\frac{1}{w_{xm}} + \left[\frac{c_{тз}}{u_{вз}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}}\right] = \left[\frac{0{,}8}{0{,}004} - \frac{0{,}8}{0{,}016}\right] = 150.$$

и при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$ по формуле (66в):

$$j_з = \frac{c_{0з}}{w_{xm}} - \frac{c_{0з}}{w_{(n+1)з}} = \frac{0{,}8}{w_{xm}} - \frac{0{,}8}{0{,}016} = \frac{0{,}8}{w_{xm}} - 50.$$

Таким образом, для данного примера значение m_1 определяется при $w_{1з} < w_{xm} < w_{Нз}$:

$$m_1 = \frac{\frac{2{,}21}{w_{xm}} - 167}{75\,000 w_{xm}};$$

при $w_{Нз} < w_{xm} < u_{вз}$

$$m_1 = \frac{\frac{2{,}21}{w_{xm}} - 167}{150};$$

при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$

$$m_1 = \frac{\frac{2{,}21}{w_{xm}} - 176}{\frac{0{,}8}{w_{xm}} - 50}.$$

Уравнение (149) для определения значения m_2 имеет вид:

$$m_2 = \frac{\rho_{дп} - \rho_{0п}[w_{xm}, w_{(n+1)п}] + \rho_{тп}(w_{xm}, u_{вп})}{\rho_з[w_{xm}, w_{(n+1)з}]}.$$

Для нашего примера значение $\rho_{дп}$ определяется при $w_{minд} = w_{xm}$ по формуле (135):

$$\rho_{дп} = 0{,}73 u_{дп}\left[\ln \frac{u_{дп}}{u_{вп}} - \left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right) w_{xm}\right] =$$

$$= 0{,}73 \cdot 0{,}459\left[\ln \frac{0{,}459}{0{,}014} - \left(\frac{1}{0{,}014} - \frac{1}{0{,}459}\right) w_{xm}\right] = 1{,}17 - 23{,}2 w_{xm}.$$

Значения $\rho_{0п}[w_{xm}, w_{(n+1)п}]$ и $\rho_{тп}(w_{xm}, u_{вп})$ составляют:

$$\rho_{0п}[w_{xm}, w_{(n+1)п}] = 0{,}59\left(\ln \frac{0{,}018}{w_{xm}} - \frac{0{,}018 - w_{xm}}{0{,}018}\right) =$$

$$= 32{,}7 w_{xm} - 0{,}59 \ln w_{xm} - 2{,}99,$$

$$\rho_{тп}(w_{xm}, u_{вп}) = 2{,}8\left(\ln \frac{0{,}014}{w_{xm}} - \frac{0{,}014 - w_{xm}}{0{,}014}\right) =$$

$$= 199{,}92 w_{xm} - 2{,}8 \ln w_{xm} - 14{,}73.$$

Значение $\rho_з[w_{xm}, w_{(n+1)з}]$, как и $j_з$, зависит от условий осаждения наносов в отстойнике в межпромывной период и величины w_{xm}. Для случая третьей расчетной области ($w_{1з} < w_{xm} < w_{Нз}$) значение $\rho_з[w_{xm}, w_{(n+1)з}]$ определяется по формуле (166) после подсчета отдельных элементов:

$$\rho_{0з\,[\,w_{Hз},\,w_{(n+1)з}]} = 0{,}8\left(\ln\frac{16}{2} - \frac{16-2}{16}\right) = 0{,}96;$$

$$\rho_{тз\,(w_{Hз},\,u_{вз})} = 0{,}8\left(\ln\frac{4{,}0}{2{,}0} - \frac{4{,}0-2{,}0}{4{,}0}\right) = 0{,}15;$$

$$a_{0з} = \frac{0{,}8}{0{,}016} = 50; \quad b_{0з\,(w_{xm},\,w_{Hз})} = (2{,}0 - w_{xm})\,(32-2{,}0-w_{xm})\,10^{-6} =$$

$$= \left[6{,}0 - 32w_{xm} + w_{xm}^2\right]\cdot 10^{-6};$$

$$a_0 b_{0з\,(w_{xm},\,w_{Hз})} = 50\cdot(60 - 32w_{xm} + w_{xm}^2)\cdot 10^{-6};$$

$$a_{тз} = \frac{0{,}8}{0{,}004} = 200;$$

$$b_{тз\,(w_{xm},\,w_{Hз})} = (2{,}0-w_{xm})\,(8-2{,}0 - w_{xm})\cdot 10^{-6} =$$

$$= (12 - 8w_{xm} + w_{xm}^2)\cdot 10^{-6};$$

$$a_{тз}\, b_{тз\,(w_{xm},\,w_{Hз})} = 200\,(12 - 8w_{xm} + w_{xm})^2\cdot 10^{-6}.$$

Подставляя эти данные в (166), получим:

$$\rho_{з\,[\,w_{xm},\,w_{(n+1)з}]} = 0{,}96 - 0{,}375w_{xm}^2;$$

при $w_{Hз} < w_{xm} < u_{вз}$, согласно формуле (167):

$$\rho_{з\,[\,w_{xm},\,w_{(n+1)з}\,]} = 0{,}8\left(\ln\frac{0{,}016}{w_{xm}} - \frac{0{,}016 - w_{xm}}{0{,}016}\right) -$$

$$-0{,}8\left(\ln\frac{0{,}004}{w_{xm}} - \frac{0{,}004 - w_{xm}}{0{,}004}\right) = 1{,}11 - 150w_{xm}$$

и при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$, согласно (168):

$$\rho_{з\,[\,w_{xm},\,w_{(n+1)з}\,]} = 0{,}8\left(\ln\frac{0{,}016}{w_{xm}} - \frac{0{,}016 - w_{xm}}{0{,}016}\right) =$$

$$= 50w_{xm} - 0{,}8\ln w_{xm} - 5{,}13.$$

Полученные значения подставляют в формулу по определению m_2, тогда при значении w_{xm} в пределах $w_{1з}$—$w_{Hз}$:

$$m_2 = \frac{144w_{xm} - 2{,}21\ln w_{xm} - 10{,}6}{0{,}81 + \dfrac{0{,}002 - w_{xm}}{0{,}004}(150w_{xm} + 0{,}3)}$$

или

$$m_2 = \frac{144w_{xm} - 2{,}21\ln w_{xm} - 10{,}6}{0{,}96 - 37\,500w_{xm}^2},$$

При $w_{Hз} < w_{xm} < u_{вз}$.

$$m_2 = \frac{144w_{xm} - 2{,}21 \ln w_{xm} - 10{,}6}{1{,}11 - 150w_{xm}},$$

а при $u_{вз} < w_{xm} < w_{(n+1)з}$:

$$m_2 = \frac{144w_{xm} - 2{,}21 \ln w_{xm} - 10{,}6}{50w_{xm} - 0{,}8 \ln w_{xm} - 4{,}10}.$$

С помощью приведенных формул по определению m_1 и m_2 подбором можно найти то значение w_{xm}, при котором $m_1 = m_2 = m$. Подбор значения w_{xm} удобнее выполнить графически, построив для этого кривые зависимости $m_1 = f(w)$ и $m_2 = f(w)$ (рис. 26). Точка пересечения кривых имеет абсциссу $w = w_{xm}$ и ординату $m_1 = m_2 = m$.

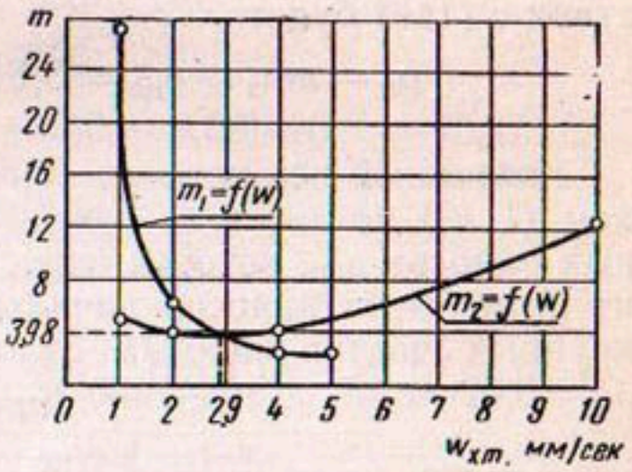


Рис. 26. Кривые зависимости m_1 и $m_2 = f(w)$.

Для данного примера точка пересечения кривых имеет абсциссу $w = 2{,}9$ *мм/сек* и ординату $m = 3{,}98$. Вес размытого грунта из донных отложений, приходящегося на 1 $м^3$ воды составляет:

$$m\rho_з \; w_{1з}, w_{(n+1)_з} = 3{,}98 \cdot 0{,}959 = 3{,}817 \; кг/м^3.$$

Таким образом, при промывке на каждый кубический метр воды приходится 3,817 *кг* дополнительного продукта размыва донных отложений.

Но эффективность промывки не ограничивается приведенной величиной. Часть наносов начальной мутности при промывке $\rho_{оп}$, состоящих из крупных частиц, не может взвешиваться потоком, вследствие того что $u_{вп} < w_{(n+1)п}$. Эти наносы опускаются в нижние слои потока и транспортируются по дну. Количество избытка наносов начальной мутности в соответствии с формулой (136) составляет:

$$\rho_{ип} = \rho_{0п}\left[w_{xm}, w_{(n+1)п}\right] - \rho_{тп}\left(w_{xп}, u_{вп}\right).$$

Значение $w_{xп}$ определяется по формуле (147):

$$w_{xп} = \frac{2{,}8 - 0{,}59}{\frac{2{,}8}{0{,}014} - \frac{0{,}59}{0{,}018}} = 0{,}0132 \; м/сек.$$

Подставляя это значение $w_{хп}$ и решая формулу по определению $\rho_{ип}$, получим:

$$\rho_{ип} = 0{,}59\left(\ln\frac{18{,}0}{13{,}2} - \frac{18{,}0-13{,}2}{18}\right) - 2{,}3\left(\ln\frac{14{,}0}{13{,}2} - \frac{14{,}0-13{,}2}{14{,}0}\right) = 0{,}02\ кг/м^3.$$

Полное количество наносов, которое подается в 1 $м^3$ воды для насыщения ее взвешенными и донными наносами в соответствии с (146) будет:

$$\rho_{п} = m\rho_{з} + \rho_{ип} = 3{,}817 + 0{,}02 = 3{,}837\ кг/м^3.$$

Указанный вес наносов (3,837 $кг/м^3$) транспортируется потоком (1 $м^3$) по дну и во взвешенном состоянии. Количество донных наносов $\rho_{дп}$, которое определяется по формуле (135), состоит из избытка наносов начальной мутности при промыве $\rho_{ип}$ и крупных частиц донных отложений $\rho_{ир}$. Как было сказано, $\rho_{ип}=0{,}02$ $кг/м^3$, а значение $\rho_{ир}$ определяется по формуле (139):

$$\rho_{ир} = m\rho_{з\left[w_{хт},\ w_{(n+1)з}\right]} - \left[\rho_{тп(w_{хт},\ w_{хп})} - \rho_{0п(w_{хт},\ w_{хп})}\right] кг/м^3,$$

при значении $w_{нз}<w_{хт}<u_{вз}$ (2,0<2,9<4,0) по формуле (167):

$$m\rho_{з\left[w_{хт},\ w_{(n+1)з}\right]} = 3{,}98\left[0{,}8\left(\ln\frac{16{,}0}{2{,}9} - \frac{16{,}0-2{,}9}{16{,}0}\right) - 0{,}8\left(\ln\frac{4{,}0}{2{,}9} - \frac{4{,}0-2{,}9}{4{,}0}\right)\right] = 0{,}674\cdot 3{,}98 = 2{,}683\ кг/м^3;$$

$$\rho_{тп(w_{хт},\ w_{хп})} = 2{,}8\left(\ln\frac{13{,}2}{2{,}9} - \frac{13{,}2-2{,}9}{14{,}0}\right) = 2{,}18\ кг/м^3;$$

$$\rho_{0п(w_{хт},\ w_{хп})} = 0{,}59\left(\ln\frac{13{,}2}{2{,}9} - \frac{13{,}2-2{,}9}{18{,}0}\right) = 0{,}56\ кг/м^3.$$

Подставляя числовые значения, получим:

$$\rho_{ир} = 2{,}683 - (2{,}18 - 0{,}56) = 1{,}063\ кг/м^3.$$

В соответствии с формулой (140) можно написать:

$$\rho_{дп} = \rho_{ип} + \rho_{ир} = 0{,}02 + 1{,}063 = 1{,}083\ кг/м^3.$$

Это же значение $\rho_{дп}$ должно получиться по формуле (135) при $w_{хт}=2{,}9$ $мм/сек$:

$$\rho_{дп} = 0{,}73\cdot 0{,}459\left[\ln\frac{0{,}459}{0{,}014} - \left(\frac{1}{0{,}014} - \frac{1}{0{,}459}\right)\cdot 0{,}0029\right] = 1{,}10 \cong 1{,}083\ кг/м^3$$

Количество наносов $\rho_{пв}$, которое взвешивается водой в объеме 1 $м^3$, определяется по формуле (144):

$$\rho_{пв} = 3{,}98\rho_{з\,(0{,}04;\ 2{,}9)} + \left[\rho_{тп(2{,}9;13{,}2)} - \rho_{0п(2{,}9;\ 13{,}2)}\right],$$

а значение $\rho_{3(0{,}04;\ 2{,}9)}$ по формуле (164).
При $w_{хт} = 0{,}0029$ *м/сек*:

$$\rho_{0з(w_{Нз},\ w_{хт})} = 0{,}8\left(\ln\frac{2{,}9}{2{,}0} - \frac{2{,}9-2{,}0}{16}\right) = 0{,}25\ кг/м^3;$$

$$\rho_{тз(w_{Нз},\ w_{хт})} = 0{,}8\left(\ln\frac{2{,}9}{2{,}0} - \frac{0{,}9}{4{,}0}\right) = 0{,}12\ кг/м^3;$$

$$a_{0з} = 50;$$

$$b_{0з(w_{хт},\ w_{Нз})} = (2{,}0 - 0{,}04)\,(2{,}16 - 2{,}0 - 0{,}04)\cdot 10^{-6} = 60{,}10^{-6};$$

$$a_{0з}\,b_{0з(w_{minз},\ w_{Нз})} = 3\cdot 10^{-3};$$

$$a_{тз} = 200,$$

$$b_{тз(w_{minз},\ w_{Нз})} = (2 - 0{,}04)\,(2\cdot 4 - 2{,}0 - 0{,}04)\,10^{-6} = 12{,}0\cdot 10^{-6};$$

$$a_{тз}\,b_{тз(w_{min\,з},\ w_{Нз})} = 2{,}4\cdot 10^{-3}.$$

Подставляя эти величины в (164), получим:

$$\rho_{з\,(w_{minз},\ w_{хт})} = 0{,}25 - 0{,}12 + \frac{3{,}10^{-3} - 2{,}4\cdot 10^{-3}}{4{,}0\cdot 10^{-3}} = 0{,}28\ кг/м^3;$$

$$\rho_{пв} = 3{,}98\cdot 0{,}285 + (2{,}18 - 0{,}56) = 2{,}754\ кг/м^3.$$

Определим необходимую длину участка отстойников, на котором поток насыщается продуктами размыва русла ($m\rho_з = 3{,}817$ *кг/м³*). Предельное расстояние, на котором происходит насыщение потока в отстойнике при промывке в соответствии с (183) будет:

$$L = \frac{H_п\,v_м}{u_{вmax} - w_{max}} = \frac{1{,}5\cdot 1{,}43}{u_{вmax} - w_{max}} = \frac{2{,}145}{u_{вmax} - w_{max}}.$$

Значение $u_{в\,max}$, как для случая $u_{вп} < w_{(n+1)п}$ ($u_{вп} = 14{,}0$ *мм/сек* и $w_{(n+1)п} = 18{,}0$ *мм/сек*), нужно принять равным $w_{хп}$. Таким образом, $u_{в\,max}\ w_{хп} = 13{,}2$ *мм/сек*.

Величину w_{max}, как и для условий $u_{вп} < w_{(n+1)п}$, находим подбором по формуле (184 а). Подставляя в эту формулу известные значения $m = 3{,}98$, $w_{хт} = 2{,}9$ *мм/сек* и $w_{хп} = 13{,}2$ *мм/сек*, получим:

$$3{,}98\,\rho_{з\,(w_{хт},\ w_{max})} - c_д\left(\frac{1}{u_{вп}} - \frac{1}{u_{дп}}\right)(w_{max} - w_{хт}) =$$

$$= 2{,}8\left(\ln\frac{13{,}2}{2{,}9} - \frac{10{,}3}{14{,}0}\right) - 0{,}59\left(\ln\frac{13{,}2}{2{,}9} - \frac{10{,}3}{18{,}0}\right) = 1{,}62\ кг/м^3.$$

При значениях $u_{вп}=0{,}014$ *м/сек*, $u_{дп}=0{,}459$ *м/сек* и $c_{дп}=0{,}73\cdot 0{,}459=0{,}335$, найдем:

$$3{,}98\,\rho_{з\,[w_{хп},\,w_{max}]}-0{,}335\left(\frac{1}{0{,}014}-\frac{1}{0{,}459}\right)(w_{max}-0{,}0029)=1{,}62$$

или

$$\rho_{з\,(w_{хт},\,w_{max})}-0{,}0842\,(71{,}4-2{,}2)\,(w_{max}-0{,}0029)=0{,}407;$$

$$\rho_{з\,(w_{хт},\,w_{max})}-5{,}83\,w_{max}=0{,}39.$$

При условии $w_{Нз}<w_{хт}<u_{вз}$ ($w_{Нз}=2{,}0$, $w_{хт}=2{,}9$ и $u_{вз}=4{,}0$ *мм/сек*) и допуская, что $w_{max}>u_{вз}$ для определения $\rho_{з(w_{хт},\,w_{max})}$, согласно таблицы (18), можно воспользоваться уравнением (193), которое при заданных значениях имеет вид:

$$\rho_{з\,(w_{хт},\,w_{max})}=0{,}8\left(\ln\frac{w_{max}}{0{,}0029}-\frac{w_{max}-0{,}0029}{0{,}016}\right)-$$

$$-0{,}8\left(\ln\frac{0{,}004}{0{,}0029}-\frac{0{,}004-0{,}0029}{0{,}004}\right),$$

откуда:

$$\rho_{з\,(w_{хт},\,w_{max})}=0{,}8\,(\ln w_{max}-62{,}5\,w_{max}+5{,}965).$$

После подстановки в (а) получается следующее уравнение:

$$\ln w_{max}=69{,}8\,w_{max}+5{,}477=0.$$

Решая его подбором, получим значение $w_{max}=0{,}0066$ *м/сек* $=6{,}6$ *мм/сек*.

Подставляем найденные значения $u_{в\,max}=w_{хп}=13{,}2$ *мм/сек* и $w_{max}=6{,}6$ *мм/сек* в формулу для определения L:

$$L=\frac{2{,}145}{0{,}0132-0{,}0066}=\frac{2{,}145}{0{,}0066}=325\ м.$$

Итак, в первый период промывки отстойника размыв донных отложений, произойдет на начальном участке отстойника длиной 325 *м*. В дальнейшем размыв распространяется на нижележащие участки дна.

Количество взвешенных наносов в конце отстойника с учетом начальной мутности $\rho_{оп}$ равно:

$$\rho_в=\rho_{оп}-\rho_{ип}+\rho_{пв}=3{,}0-0{,}02+2{,}754=5{,}734,$$

а донных наносов:

$$\rho_{дп}=1{,}083\ кг/м^3.$$

Общий вес наносов, взвешенных и донных, транспортируемых каждым кубометром потока в нижний бьеф отстойника, составляет

$$\rho_в+\rho_{дп}=5{,}734+1{,}083=6{,}817\ кг/м^3.$$

Полное количество размытых наносов за одну секунду во время промывки при расходе воды $Q_п$ получается по формуле:

$$G = Q_п m\rho_з \left[w_{minз}; w_{(n+1)з} \right] = 3{,}817 Q_п \frac{кг}{сек}$$

или

$$3{,}817 vHB = 3{,}817 \cdot 1{,}43 \cdot 1{,}5 B = 8{,}19 B \; кг/сек.$$

Продолжительность промывки для удаления осевших наносов с объемом V_0 ($м^3$) и объемным весом $\gamma_н$ составляет:

$$T_0 = \frac{1000 V_0 \gamma_н}{m\rho_з} = \frac{1000}{3{,}817} \cdot V_0 \gamma_н.$$

Таким образом, в сбросной канал поступает 6,817 $кг/м^3$ донных и взвешенных наносов.

Скорость течения воды, а следовательно, и транспортирующая способность потока в сбросном канале меньше, чем в отстойнике при промыве, поэтому в сбросном канале произойдет осаждение части наносов.

Количество наносов, которое поток может транспортировать в отстойнике $\rho_{крс}$ определяется по формуле (201):

$$\rho_{крс} = \rho_{кр0} - \rho_{нс},$$

где $\rho_{кро}$ — мутность потока (взвешенных и донных наносов) в начале сбросного канала;

$$\rho_{кр0} = \rho_{0п} + m\rho_з = 3{,}0 + 3{,}817 = 6{,}817 \; кг/м^3.$$

Значение критической мутности в сбросном канале определяется по формуле (206):

$$\rho_{крс} = \rho_{0п}(w_1, w_{хс}) + m\rho_з (w_{minз}, w_{хс}) + \rho_{дс}(w_{хс}, u_{дс}) + \rho_{тс}(w_{хс}, u_{вс}).$$

Прежде чем определить отдельные члены этой формулы найдем значения $w_{хс}$, $u_{дс}$, $c_{дс}$, $u_{вс}$ и $c_{тс}$.

Наибольшая взвешивающая скорость потока в сбросном канале при $v = 1{,}14$ $м/сек$ и $i = 0{,}00026$ составляет:

$$u_{вс} = 0{,}065 (v - 0{,}05) i^{1/4} = 0{,}0092 \; м/сек.$$

В соответствии с этим значение постоянной кривой распределения $c_{тс}$ будет:

$$c_{тс} = 200 \; u_{вс} = 1{,}84 \; кг/м^3.$$

Значение наибольшей крупности частиц донных наносов можно определить, используя уравнение (128 б), как для широких потоков:

$$d_{max} \left(\lg \frac{8{,}8 \cdot 2}{d_{max}} \right)^2 = 0{,}053 \cdot 1{,}14^2 = 0{,}069.$$

Решая подбором, получим $d_{max}=0{,}0057$ *м*. Этому диаметру частиц согласно таблицы соответствует гидравлическая крупность $u_{дс}=0{,}322$ *м/сек*.

Значение постоянной кривой распределения по крупности донных наносов будет:

$$c_{дс}=0{,}73\ \ u_{дс}=0{,}73\cdot 0{,}322=0{,}236\ кг/м^3.$$

По приведенным значениям $u_{вс}$, $c_{тс}$, $u_{дс}$ и $c_{дс}$, а также по $m=3{,}98$, $c_{оц}=0{,}54$ *кг/м*^{3}, $w_{(n+1)п}=0{,}018$ *м/сек*. $c_{оз}=0{,}8$ *кг/м*^{3}, $w_{(n+1)з}=0{,}016$ *м/сек*, $u_{вз}=0{,}004$ *м/сек*, $c_{тз}=0{,}8$ *кг/м*^{3}, с помощью формулы (203) можно определить $w_{хс}$, которое при $a_{оп}=50$, $a_{оз}=50$, $a_{тз}=a_{тс}=900$, $a_{дс}=0{,}73$ и $\frac{c_{дс}}{u_{вс}}=25{,}7$ равно:

$$w_{хс}=\frac{0{,}59+3{,}98\,(0{,}8-0{,}8)-1{,}84}{32{,}8+3{,}98(50-200)-200-0{,}73+\dfrac{0{,}806}{0{,}0092}}=0{,}0017\ м/сек=$$
$$=1{,}7\ мм/сек.$$

Далее находим значения отдельных членов, входящих в формулу (206).

Величина начальной мутности при промыве в пределах крупностей $w_1=0{,}04$ *мм/сек* и $w_{хс}=1{,}7$ *мм/сек*:

$$\rho_{0п\,(w_1,\,w_{хс})}=0{,}59\left(\ln\frac{1{,}7}{0{,}04}-\frac{1{,}7-0{,}04}{18{,}0}\right)=2{,}17\ кг/м^3.$$

Количество размытых наносов $\rho_{з(w_{min\,з},\,w_{хс})}$ при $w_{min\,з}=w_{1з}$ и $w_{хс}<w_{Нз}$ как для условий осаждения, соответствующих третьей расчетной области, можно вычислить по формуле (68), заменив в ней значения w_i и w_{i+1} соответственно на $w_{1з}$ и $w_{хс}$. Отдельные элементы, входящие в (68), равны:

$$a_{0з}=50;$$
$$b_{0з\,(w_{1з},\,w_{хс})}=(w_{хс}-w_{1з})\,(2w_{(n+1)з}-w_{хс}-w_{1з})=$$
$$=(1{,}7-0{,}04)\,(32-1{,}7-0{,}04)=50{,}23\cdot 10^{-6}.$$
$$a_{0з}\,b_{0з\,(w_{1з},\,w_{хс})}=50\cdot 50{,}23=2{,}51\cdot 10^{-3};\ a_{тз}=200;$$
$$b_{тз\,(w_{1з},\,w_{хс})}=(1{,}7-0{,}04)\,(8-1{,}7-0{,}04)\cdot 10^{-6}=10{,}4\cdot 10^{-6};$$
$$a_{тз}\,b_{тз\,(w_{1з},\,w_{хс})}=200\cdot 10^{4}\cdot 10^{-6}=2{,}08\cdot 10^{-6}.$$

Подставляя эти значения, получим:

$$m\rho_{з\,(w_{1з},\,w_{хс})}=3{,}98\,\frac{2{,}51\cdot 10^{-3}-2{,}08\cdot 10^{-3}}{2:2\cdot 10^{-3}}=0{,}43\ кг/м^3.$$

При $w_{\text{min д}} = w_{\text{хс}}$ в соответствии с формулой (135)

$$\rho_{\text{дс}} = 0{,}73 \cdot 0{,}322 \left[\ln \frac{0{,}322}{0{,}0092} - \left(\frac{1}{0{,}0092} - \frac{1}{0{,}322} \right) 0{,}0017 \right] = 0{,}80 \ кг/м^3.$$

Транспортирующая способность потока в сбросном канале для крупности наносов в пределах частиц $w_{\text{хс}} - u_{\text{вс}}$ будет:

$$\rho_{\text{тс}\,(w_{\text{хс}},\, u_{\text{вс}})} = 1{,}84 \left(\ln \frac{9{,}2}{1{,}7} - \frac{9{,}2 - 1{,}7}{9{,}2} \right) = 1{,}61 \ кг/м^3.$$

Таким образом, критическая мутность потока в сбросном канале составляет:

$$\rho_{\text{кр.с}} = 2{,}17 + 0{,}43 + 0{,}80 + 1{,}61 = 5{,}01 \ кг/м^3.$$

Следовательно, из общей мутности 6,817 $кг/м^3$, которая поступает в сбросной канал, транспортируется только 5,01 $кг/м^3$. Поэтому в канале образуется избыток наносов.

$$\rho_{\text{нс}} = 6{,}817 - 5{,}01 = 1{,}807 \ кг/м^3.$$

Критическая мутность $\rho_{\text{кр.с}} = 5{,}01$ $кг/м^3$ установится в сбросном канале после полного осаждения избытка наносов, что произойдет в соответствии с (207) на расстоянии

$$L = \frac{1{,}14 \cdot 2{,}0}{0{,}0017} = 1341 \ м.$$

Следовательно, при длине сбросного канала $L = 2000$ $м$ в нем полностью осаждаются наносы избыточной мутности, которые необходимо удалить землесосами или гидравлическим способом путем продления периода промывки.

Настоящий пример с условиями заиления сбросного канала приведен с целью иллюстрации методики расчета для такого случая. На практике же нецелесообразно допускать заиления сбросного канала. Для этого транспортирующая способность потока в сбросном канале должна быть не меньше, чем в отстойнике при промыве.

Как уже говорилось, А. Г. Нацвлишвили в течение 1960 и 1961 гг. проводил исследования по промыву многокамерного отстойника Баграм-Тапинского гидроузла (рис. 8). Краткое описание этого отстойника и вопросов, связанных с условиями осаждения наносов в нем, изложено в § 3 настоящей работы.

Исследования проводились в два периода: между промывками и во время промывок.

В течение первого периода изучали вопросы, связанные с осаждением, количеством и составом осевших в камере наносов, а также определяли мутность в начале и в конце отстойника, фракционный состав наносов, степень осветления потока и др. Наносы отстаивались, пока слой отложений не достигал 0,7—1,0 $м$. Перед каждой промывкой отстойника измеряли объем

осевших в нем наносов. Анализ проб показал, что основную массу наносных отложений в отстойнике (50—80%) составляли частицы с диаметром от 0,015 до 0,1 *мм*, а среднее значение объемного веса за 1960 г. было $\gamma_н = 1{,}15$ *т/м*³ и за 1961 г. — $\gamma_н = 1{,}20$ *т/м*³.

За время второго периода в состав исследований входили вопросы, связанные непосредственно со смывом наносных отложений из отстойника, а именно: определение мутности в начале и в конце промываемой секции отстойника, интенсивность размыва, изменение мутности по длине отстойника и во времени, состав и объем размытых наносов в период промывки и др.

Промывки камеры проводили при следующих гидравлических элементах потока: расход воды $Q = 5{,}33—12{,}59$ *м*³/*сек*, средняя глубина потока $v_{ср} = 0{,}81—2{,}50$ *м/сек*, глубина воды в отстойнике $H_{ср} = 0{,}64—1{,}89$ *м*, уклон свободной поверхности $i = 0{,}00017—0{,}0048$, разность между отметками уровня воды в начале и в конце секции отстойника $\Delta H = 2{,}0—55{,}3$ *см*, гидравлический радиус потока R в пределах 0,53—1,16 *м*.

При промывках количество наносов, транспортируемых потоком по дну, определяли способом баланса по полному объему размытых наносов (данные промеров поперечных профилей) по длине секций отстойника и объему наносов, транспортируемых потоком во взвешенном состоянии. Количество транспортируемых во взвешенном состоянии наносов определялось по данным отбора проб мутности воды.

Анализ этих величин показал, что количество размытых из отстойника наносов с мелкопесчаным составом и транспортируемых в донном слое было от 6,3 до 83,5% от взвешенных и в среднем составляло 31,0%; наиболее интенсивный размыв наносных отложений происходил в начальный период промывки. В дальнейшем (примерно после одного часа) размыв резко сокращается.

В таблице 19 приведены измеренные значения мутности в 3 и 5 камерах отстойника во время промыва их. Там же приведены расчетные значения мутности, определенные по изложенному выше методу. При этом значение $c_д$ постоянной кривой распределения донных наносов вычислено по формуле (134б), а количество размыва наносов в отстойнике, отнесенное к единице объема воды при $(u_{в\,max} - w_{max}) L < 2 q_п$, по формуле:

$$\rho_{расч} = m\rho_з \frac{u_{в max} - w_{max}}{2q_п} L \text{ кг/м}^3, \qquad (225а)$$

а при $(u_{в max} - w_{max}) L > 2q_п$,

$$\rho_{расч} = m\rho_з \text{ кг/м}^3. \qquad (225б)$$

Как видно из приведенных в таблице 19 данных, расчетные величины довольно близко совпадают с измеренными в натуре.

ТАБЛИЦА 19

Расчетные и измеренные мутности при промыве Баграм-Тапинского отстойника в 1961 г.

Дата	Секция, в которую поступает вода	Секции, которые промываются	Среднее значение		Мутность потока в конце секции, кг/м³				Общее количество взвешенных и донных наносов, кг/м³			Отклонение, % $\frac{\rho_{изм}-\rho_{расч}}{\rho_{расч}}100$
					измеренная		расчетная		в начале секции ρ_0	в конце секции		
			$v_{ср}$, м/сек	$H_{ср}$, м	взвешенные наносы $\rho_{пв.\ изм}$	донные наносы $\rho_{д\cdot\ изм}$	взвешенные наносы	донные наносы		измеренная $\rho_{изм}$	расчетная $\rho_{расч}$	
25/IV		3а	1,22	1,46	4,56	1,33	5,18	1,20	2,47	8,36	8,85	—5
	3а	3б	1,77	1,01	10,70	0,73	10,70	0,94	8,36	19,79	20,00	—1
	3б	3б	0,94	1,81	1,67	0,63	1,66	0,56	2,47	4,77	4,69	+2
		3а	1,23	1,38	4,16	0,99	3,74	0,60	4,77	9,92	9,11	+8
10/V		3а	1,59	1,00	10,13	2,49	10,11	1,86	3,15	15,77	15,12	+4
	3а	3б	2,50	0,64	20,10	2,50	23,27	2,86	15,77	38,37	41,90	—9
	3б	3б	0,81	1,89	0,30	0,25	0,44	0,29	3,74	4,29	4,47	—4
		3а	1,21	1,27	4,03	1,23	4,20	0,94	4,29	9,55	9,43	+1
13/V		5а	1,13	1,32	2,54	1,22	2,81	0,95	2,54	6,30	6,30	0
	5а	5б	1,49	1,00	5,43	1,06	4,90	0,47	6,30	12,79	11,67	+9
	5б	5б	0,85	1,46	0,68	0,30	0,46	0,35	2,54	3,52	3,35	+5
		5а	1,29	0,96	4,73	1,34	4,63	1,07	3,52	9,59	9,22	+4

Продолжение

Дата	Секция, в которую поступает вода	Секции, которые промываются	Среднее значение		Мутность потока в конце секции, *кг/м³*				Общее количество взвешенных и донных наносов, *кг/м³*			Отклонение, % $\frac{\rho_{изм}-\rho_{расч}}{\rho_{расч}}100$
					измеренная		расчетная			в конце секции		
			$v_{ср}$, *м/сек*	$H_{ср}$, *м*	взвешенные наносы $\rho_{пв\cdot изм}$	донные наносы $\rho_{д\cdot изм}$	взвешенные наносы	донные наносы	в начале секции ρ_0	измеренная $\rho_{изм}$	расчетная $\rho_{расч}$	
26/V		5а	1,10	1,23	2,46	0,88	2,94	0,86	0,37	3,71	4,17	—12
	5а	5б	1,68	0,93	7,88	1,02	7,89	1,05	3,71	12,61	12,65	0
	5б	5б	1,12	1,57	1,64	0,48	1,86	0,63	0,37	2,49	2,86	—15
		5а	1,37	1,29	4,30	1,37	4,45	0,95	2,49	8,16	7,89	+3
27/V		3а	0,98	1,51	1,15	0,44	1,12	0,43	0,28	1,87	1,83	0
	3а	3б	1,22	1,22	4,40	0,92	3,45	0,71	1,87	7,19	6,03	+16
	3б	3б	1,12	1,87	1,95	1,41	1,66	0,50	0,28	2,64	2,44	+ 8
		3а	1,42	1,48	4,26	1,05	3,58	0,96	2,64	7,95	7,18	+10
9/VI	5а	5а	0,95	0,95	3,09	0,95	2,79	0,85	1,14	5,18	4,78	+ 8
	5б	5б	1,00	0,89	2,74	1,10	3,37	0,94	1,14	4,98	5,45	— 9
10/VI		3а	0,88	1,01	1,88	0,74	2,12	0,71	0,59	3,21	3,42	— 7
	3а	3б	1,19	0,75	5,07	0,72	4,23	0,52	3,21	9,00	7,96	+12
	3б	3б	1,06	1,26	2,41	0,69	3,45	0,95	0,59	3,69	4,99	—35
		3а	1,41	0,95	4,32	1,31	5,60	0,88	3,69	9,32	10,17	— 9

Глава III

Заиление русловых водохранилищ, его расчет и промыв отложений

Сооружение плотинных гидроузлов на реках, транспортирующих большое количество наносов, коренным образом изменяет русловой режим реки. Взвешенные и донные наносы заиляют и заносят верхний бьеф сооружения, уровень воды на заиленных участках повышается, в связи с этим изменяются места выклинивания подпора, осветленный поток размывает русло реки на большом протяжении ниже узла.

Особую важность прогноз руслового режима и его регулирование приобретают при проектировании сооружений на р. Аму-Дарье.

На Аму-Дарье проектируются плотинные гидроузлы в створах Келиф, Кизыл-Аяк, Тюя-Муюн, Тахиа-Таш. Крупные водохранилища для орошения проектируются на рр. Мургаб, Теджен, несущих большое количество взвешенных наносов.

Опыт эксплуатации построенных оросительных водохранилищ на рр. Мургаб и Теджен (Гиндукушское, Иолотанское, Колхоз-Бентское, Таш-Кепринское и Первое Тедженское) показал, что они усиленно заиляются, вследствие чего относительно быстро выходит из строя их регулирующая емкость и резко повышаются уровни воды в зоне выклинивания подпора. Последнее приводит к затоплению ценных угодий, населенных пунктов и других важных народнохозяйственных объектов. Процессы заиления водохранилищ и выклинивания подпора до сих пор оставались мало изученными, не было обоснованных рекомендаций по борьбе с этими явлениями.

В 1960—1962 гг. ВНИИГиМом были проведены исследования для составления более обоснованных рекомендаций по расчету сроков заиления и выклинивания подпора, а также по борьбе с заилением водохранилищ, расположенных на реках с мелкопесчаным руслом и большим количеством мелких взвешенных наносов. В качестве объекта было выбрано, как наиболее типичное в этом отношении, Первое Тедженское водохранилище на р. Теджен (Туркменская ССР). Кроме того, были использованы материалы исследований, проводившихся в прошлые годы по

изучению фракционного состава взвешенных наносов р. Аму-Дарьи, динамики осаждения взвешенных наносов на крупномасштабной модели отстойника, а также данные гидрометслужбы и Среднеазиатского отделения Гидропроекта. Были также использованы материалы обследования Таш-Кепринского водохранилища на р. Мургаб. Ниже приведены краткие сведения

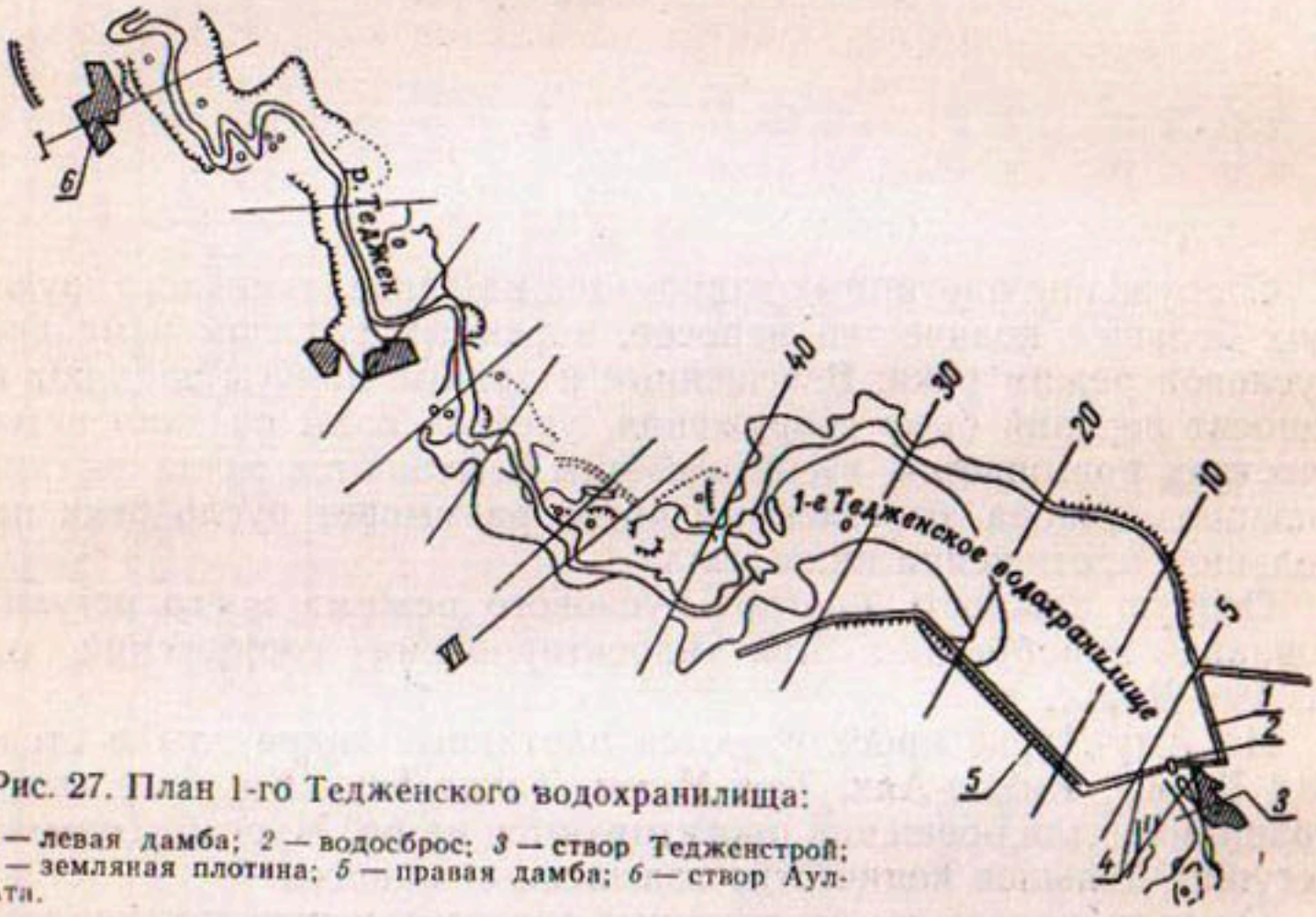


Рис. 27. План 1-го Тедженского водохранилища:

1 — левая дамба; *2* — водосброс; *3* — створ Тедженстрой; *4* — земляная плотина; *5* — правая дамба; *6* — створ Аул-Ата.

о водохранилище на р. Теджен — основном объекте исследований.

Первое Тедженское водохранилище было введено в эксплуатацию в 1950 г. Узел сооружений этого водохранилища включает земляную плотину, железобетонный водовыпуск и дамбы обвалования (рис. 27). Проектная емкость водохранилища с учетом наращивания плотины и дамб на 1 *м* 177,2 млн. $м^3$. К началу 1958 г. полезный объем водохранилища составлял 119,0 млн. $м^3$, мертвый объем — 2,0 млн. $м^3$, а в начале 1962 г. емкость водохранилища была примерно 98,0 млн. $м^3$, т. е. заиление достигло 44,0% емкости водохранилища. Длина чаши водохранилища равна 10 *км*, средняя ширина — 2,5 *км*, площадь зеркала — 25,0 $км^2$, наибольшая ширина — 4,0 *км*. Длина плотины 1,2 *км*, железобетонный водовыпуск разделен на 3 пролета шириной 5 *м* каждый. Отметка порога водовыпуска на 3,0 *м* выше отметки дна русла р. Теджен. Расчетный максимальный расход водовыпуска 580 $м^3/сек$ при разности уровней верхнего и нижнего бьефов 11,20 *м*.

§ 16. Режим взвешенных наносов р. Теджен

Река Теджен (длина 1124 *км*) берет начало с северо-западных отрогов Гиндукуша на территории Афганистана. Питание реки в основном снеговое. Большая часть водосбора расположена на высоте 2000—2500 *м*. Паводок проходит с конца марта до конца мая. С июля по сентябрь сток обычно отсутствует. На ход паводка значительное влияние оказывают осадки в виде дождей, выпадающие в марте—апреле, а иногда и в мае. Максимальные расходы (700—800 $м^3/сек$) зафиксированы на ближайшем гидрометрическом створе выше водохранилища (Аул-Ата — 32 *км* выше плотины).

Наибольшая мутность бывает на подъемах пиков паводка. В эти периоды, когда поток перегружен мелкими наносами с $d<0{,}01$ *мм*, происходит их осаждение и резкий подъем дна. На спадах пиков паводка мутность уменьшается, поток реки менее насыщен мелкими частицами, резко понижается дно за счет вымыва этих частиц из донных отложений.

Наибольшая измеренная мутность в створе Аул-Ата за период исследований была 3 мая 1960 г. — 94,0 $кг/м^3$, 3 мая 1961г. — 69,96 $кг/м^3$, и 8 апреля 1962 г. — 61,3 $кг/м^3$. Обычно средняя мутность в период паводка бывает в пределах 10—30 $кг/м^3$, максимальная — в отдельных случаях превосходит 100 $кг/м^3$.

ТАБЛИЦА 20

Фракционный состав и предельная гидравлическая крупность взвешенных наносов р. Теджен

Периоды	Мутность по фракциям, %							Предельная гидравлическая крупность, *мм/сек*		Число анализов
	$d<0{,}01$	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	0,10—0,25	$d>0{,}25$	W_{n+1}	W_s	
Март (1961—1962 гг.)	55,69	28,63	5,21	9,63	0,77	0,07	—	3,0	0,004	
Апрель (1960—1962 гг.)	36,15	33,86	10,55	6,37	11,32	1,74	0,01	10,9	0,0105	
Май (1960—1962 гг.)	26,85	32,03	15,05	8,93	15,46	1,44	0,24	12,8	0,02	
1960	32,45	26,71	12,19	8,45	17,90	2,28	0,02	21,35	0,012	19
1961	34,49	31,66	11,65	7,24	13,92	0,70	0,34	12,7	0,0113	24
1962	29,22	39,03	14,54	8,56	7,84	0,81	—	6,7	0,022	19
1960—1962 гг.	32,23	32,45	12,71	8,04	12,94	1,51	0,12	11,2	0,014	62

Фракционный состав взвешенных наносов резко меняется с ходом паводка. На подъеме паводковых пиков вместе с увеличением общей мутности резко возрастает содержание мелких фракций с $d<0{,}01$ *мм*. Особенно это проявляется при дождевых паводках; при снеговых — отличие во фракционном составе наносов на подъемах и пиках паводка в значительной мере сглаживается, состав взвешенных наносов р. Теджен в этот период сходен с аму-дарьинскими [30].

На основании отбора проб на мутность и фракционного анализа были определены осредненный состав взвешенных наносов за отдельные периоды времени и предельная гидравлическая крупность (наибольшая w_{n+1} и наименьшая w_1) по методу А. Г. Хачатряна (табл. 20).

Чтобы выявить влияние, которое оказывает методика проведения пипеточного анализа на фракционный состав наносов, в 1961 и 1962 гг. для семи случаев был проведен анализ одних и тех же проб наносов по методу ВНИИГиМ гидрометслужбы [23]. Сопоставление результатов показало, что при анализе по методу гидрометслужбы содержание самой мелкой фракции ($d<0{,}01$ *мм*) преувеличивается в 1,7 раза (табл. 21).

Близкий к этому результат был получен при исследованиях, проведенных в 1955—1958 гг. на р. Аму-Дарье в голове Каракумского канала [30], где соотношение содержания фракции с $d<0{,}01$ *мм* при анализе по обоим методам получилось равным двум.

Уменьшение этого отношения для условий р. Теджен объясняется тем, что некоторые пробы (например, 4/IV 1961 г., 8 и 11/IV 1962 г.) были отобраны в период подъема первых пиков с большим количеством мелких взвешенных наносов ($d<$

ТАБЛИЦА 21

Результаты определения фракционного состава наносов по методу ВНИИГиМ и гидрометслужбы

Дата	Анализ по методу ВНИИГиМ						
	общая мутность, $кг/м^3$	Мутность по фракциям, %					
		<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	>0,10
4/IV 1961 г.	28,156	54,95	30,16	8,12	2,58	4,19	—
18/IV 1961 г.	14,567	8,08	71,11	11,16	4,91	4,74	—
8/IV 1962 г.	61,268	83,19	5,56	3,83	5,74	1,68	—
11/IV 1962 г.	30,613	91,04	5,85	1,75	0,90	0,46	—
26/IV 1962 г.	22,307	3,62	72,84	14,24	6,82	2,48	—
2/V 1962 г.	33,17	21,61	41,75	13,85	8,57	13,97	0,25
6/V 1962 г.	15,50	8,23	45,65	12,32	10,88	22,43	0,49
		38,67	38,99	9,33	5,77	7,14	0,10

Продолжение

Дата	Анализ по методу гидрометслужбы						
	навеска, *г*	Содержание фракций, %					
		<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	>0,10
4/IV 1961 г.	10	65,64	9,88	13,28	1,08	10,12	—
18/IV 1961 г.	10	60,80	6,72	9,76	7,12	13,23	2,37
8/IV 1962 г.	10	71,56	11,94	12,20	4,20	0,10	—
11/IV 1962 г.	10	89,2	5,36	5,00	0,26	0,18	—
26/IV 1962 г.	10	60,44	11,54	17,24	6,56	4,22	—
2/V 1962 г.	10	50,8	17,44	11,60	10,72	9,44	—
6/V 1962 г.	10	59,52	17,36	10,80	8,20	4,12	—
		65,42	11,46	11,41	5,45	5,92	0,34

<0,01 *мм*). В этот период разница в содержании этой фракции, определяемой по обоим методам, незначительна (табл. 21). При исключении из сопоставления результатов анализов проб, отобранных 11/IV 1962 г., когда частицы с $d<0{,}01$ *мм* составляли более 90%, среднее содержание этой фракции, определяемое по методу гидрометслужбы, примерно в 2 раза больше, чем по методу ВНИИГиМ.

Для условий снегового паводка, при котором проходит основная часть стока взвешенных наносов р. Теджен с фракционным составом, близким к фракционному составу аму-дарьинских наносов, рекомендуется принимать переходный коэффициент 0,5 для определения содержания фракции с $d<0{,}01$ *мм*, по данным гидрометслужбы.

§ 17. Осаждение наносов в водохранилище

Несмотря на то что Тедженское водохранилище заилено более чем на 40%, весь твердый сток, поступающий сверху, почти полностью аккумулируется в его чаше и на подходах к ней. По данным наблюдений за 1958—1962 гг., сток взвешенных наносов ниже водохранилища (створ Тедженстрой) составлял всего 0,3% от стока взвешенных наносов выше водохранилища (створ Аул-Ата); 99,7% взвешенных наносов оседало в водохранилище и в зоне подпора (табл. 22).

После обработки данных съемок заиления Тедженского водохранилища, проведенной весной 1958 г. и осенью 1960 г., и сопоставлений их с данными стока наносов (табл. 22) было установлено, что в чаше водохранилища осело 63,9% наносов, а в зоне подпора — 36,1% наносов. В самой чаше водохранилища заиле-

ТАБЛИЦА 22

Стоки взвешенных наносов р. Теджен выше и ниже водохранилища

Периоды	Сток взвешенных наносов, тыс. *т*		Осело в водохранилище и в зоне подпора, тыс. *т*	В % к стоку в створе Аул-Ата
	в створе Аул-Ата	в створе Теджен-строй		
1958 г. (с 11 апреля)	4 319,9	16,2	4 303,7	99,6
1959 г.	1 017,9	3,1	1 014,8	99,7
1960 г.	8 124,6	6,9	8 117,7	99,9
1961 г.	8 988,6	38,7	8 949,9	99,6
1962 г.	5 356,0	6,5	5 349,5	99,8
1958—1962 гг.	27 807,0	71,4	27 735,6	99,7

ние распределялось крайне неравномерно (более 80% наносов отложилось на протяжении первых 4 *км*).

При пропуске паводковых расходов через водохранилище с полностью открытым водосбросом взвешенные наносы также почти полностью аккумулировались в его чаше. В период 24/III—11/IV 1961 г. при пропуске через водохранилище расходов 60—200 *м*³/*сек* мутность на выходе из водохранилища была 0,028 ÷ ÷ 0,142 *кг*/*м*³, тогда как мутность воды в р. Теджен выше водохранилища была 3 ÷ 67 *кг*/*м*³. Уровни воды в водохранилище в этот период на 0,98—3,49 *м* выше порога водосброса, а объемы воды 3,2—16,3 млн. *м*³ (табл. 23). Во второй и третьей декадах апреля 1959 г., когда через водохранилище пропускали расходы 42—57 *м*³/*сек*, при уровне воды в водохранилище на 1,4—2,0 *м* выше порога водосброса и при среднедекадных мутностях потока выше водохранилища (створ Аул-Ата) 2,7—4,1 *кг*/*м*³, мутность потока на выходе из водохранилища была всего 0,0077—0,0081 *кг*/*м*³. Осветление потока в водохранилище в таких размерах происходит вследствие очень малой ширины водосброса (15 *м* в свету). При таком узком водосбросе для пропуска расхода 193 *м*³/*сек* (7/IV 1961 г.) потребовался напор над порогом 3,49 *м*, а для расхода 89,9 *м*³/*сек* (5/IV 1961 г.) — 2,15 *м*. При больших подпорах значительно увеличиваются поперечные сечения потока в водохранилище, резко уменьшаются скорости и транспортирующая способность его.

Аналогичное явление наблюдается и на Таш-Кепринском водохранилище на р. Мургаб с узким водосбросным фронтом (18 *м* в свету). Это водохранилище емкостью 166 млн. *м*³, введенное в эксплуатацию в ноябре 1940 г., в настоящее время заилено более чем на 75% вместе с мертвым объемом. При обследовании 19/IV 1962 г., когда через полностью открытый водосброс пропускали расход 77 *м*³/*сек*, напор над порогом был равен

1,62 *м*, мутность выше водохранилища составляла 3,14 *кг/м*³, мутность у водосброса — 1,13 *кг/м*³.

В верхней заиленной части чаши 1-го Тедженского водохранилища на протяжении первых 2—2,5 *км* образовалось русло с шириной поверху 70—75 *м*. Мутность потока в конце этого русла (створ № 31 — 2,25 *км* от начала чаши водохранилища) в 1960 г. составляла 64%, в 1961 г. — 69% и в 1962 г. — 84% от мутности в створе Аул-Ата. Ниже этого участка по мере расширения и углубления потока мутность его резко падает. Так, по данным измерений 1962 г., мутность в створе № 31 составляла в среднем 84% от мутности в створе Аул-Ата, а мутность в створе № 20 (5 *км* от начала чаши) — всего 0,75% и в створе Тедженстрой — 0,1%. Например, 3 мая 1962 г. мутность в створе Аул-Ата составляла 27,6 *кг/м*³, в створе № 31 — 22,99 *кг/м*³, в створе № 20 — 0,169 *кг/м*³, на выходе из водохранилища — 0,036 *кг/м*³ (табл. 23). В это время через водохранилище пропускался расход 185 *м*³/*сек* при уровне в нем на 1,07 *м* ниже проектного. Аналогичные результаты были получены при исследованиях 15 мая 1962 г. Как показали данные съемки, заиление происходило по всей ширине водохранилища и распределение его по ширине было близко к равномерному (рис. 28).

На участке интенсивного осаждения наносов в 1961—1962 гг. (створ № 31 — створ № 20) распределение мутности по глубине характеризовалось резким увеличением ее от поверхности ко дну.

ТАБЛИЦА 23

Мутность потока выше и ниже водохранилища в 1961 г.

Дата	Расход в створе Аул-Ата, Q *м*³/*сек*	Мутность в створе Аул-Ата ρ, *кг/м*³	Расход в створе Тедженстрой Q, *м*³/*сек*	Напор над порогом водосброса H, *м*	Полезный объем водохранилища, *млн.м*³	Мутность в створе Тедженстрой $\rho_т$, *кг/м*³
24/III	104,1	67,37	23,0	0,98	3,2	0,0766
25/III	72,0	13,2	42,0	1,40	5,2	0,0894
26/III	102,7	21,65	58,0	1,63	6,2	0,0524
27/III	70,8	14,45	58,0	1,83	7,2	0,0657
28/III	55,3	11,85	68,0	1,95	7,9	0,0281
29/III	46,8	6,17	50,0	1,63	6,2	0,0472
30/III	39,6	8,65	37,0	1,33	4,8	0,0856
31/III	34,5	2,63	34,0	1,26	4,5	0,0675
1/IV	29,5	2,942	32,0	1,20	4,2	0,121
2/IV	44,0	2,502	28,0	1,10	3,7	0,136
3/IV	58,5	13,5	23,0	0,98	3,2	0,0604
4/IV	234,0	46,926	35,0	1,27	4,6	0,0656
5/IV	257,8	21,843	89,9	2,15	8,9	0,0314
6/IV	184,0	20,50	137,1	2,80	12,6	0,142
7/IV	96,7	17,20	193,0	3,49	16,3	0,0384
8/IV	78,0	10,18	142,8	2,90	13,9	0,139
9/IV	59,3	5,56	104,5	2,31	9,70	0,132
10/IV	52,9	5,50	73,3	1,90	7,7	0,0783
11/IV	90,0	5,00	58,4	1,83	7,3	0,118

В конце этого участка (створ № 20) почти во всей толще потока от поверхности до глубины 0,9 H мутность потока была небольшая; на глубине 0,1—0,2 *м* над дном на отдельных вертикалях

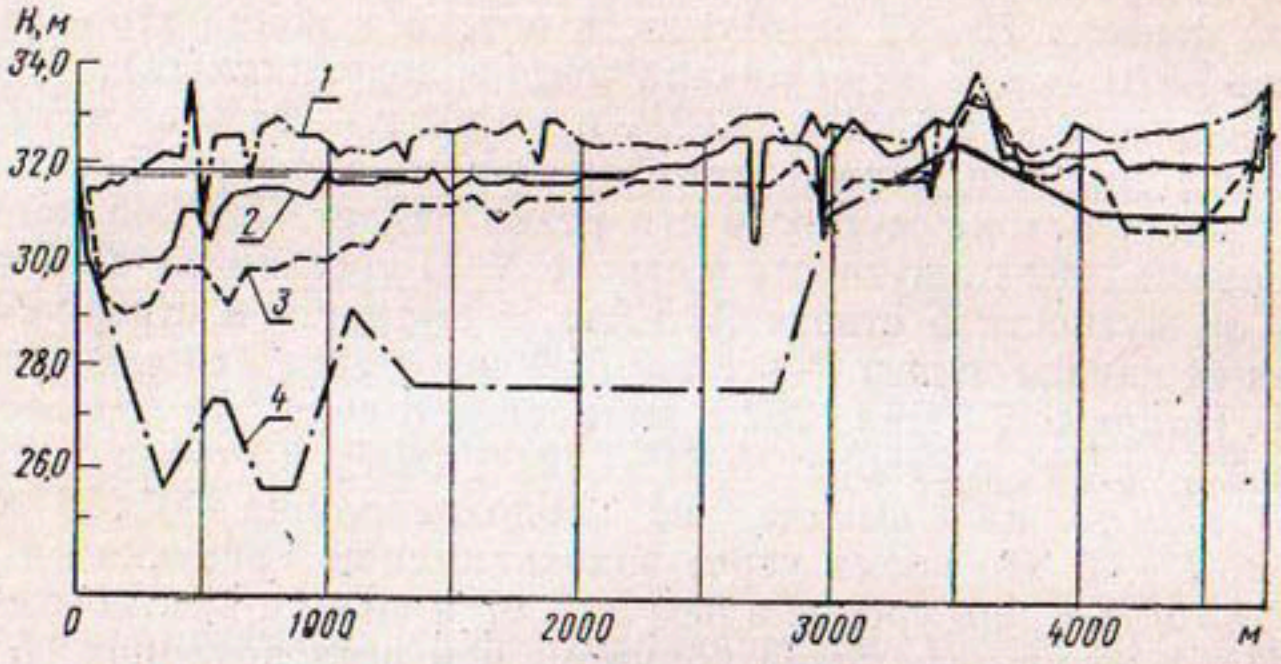


Рис. 28. Поперечные сечения верхнего бьефа 1-го Таджикского водохранилища в створе 36:

1 — за 1960 г.; *2* — 1953 г.; *3* — 1954 г.; *4* — 1936 г.

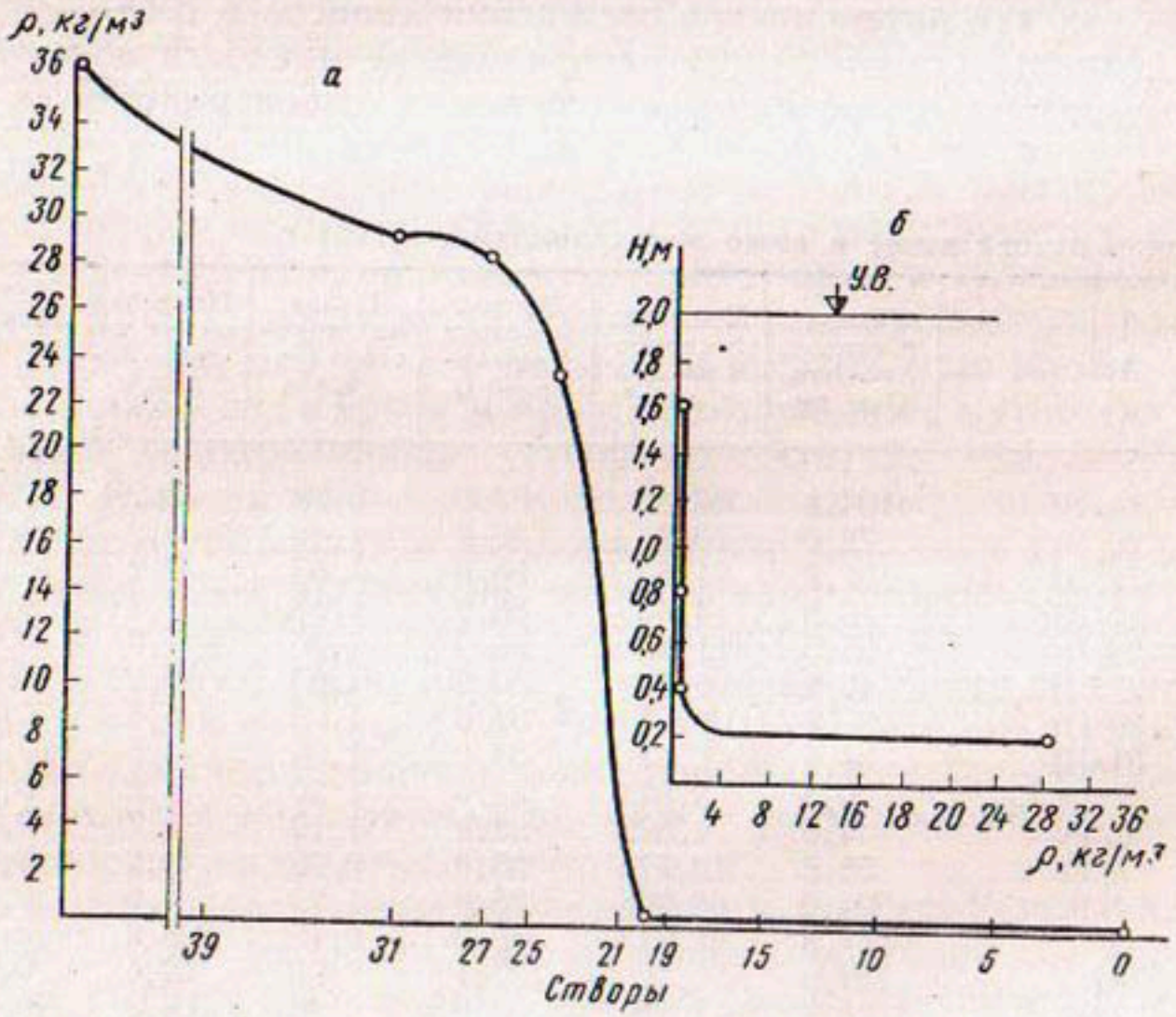


Рис. 29. Изменение мутности на участке Аул-Ата — Тедженстрой и распределение мутности по глубине потока за 15/V 1962 г.:

а — динамика мутности потока на этом участке; *б* — распределение мутности по глубине на вертикали № 6 створа 20.

против устья русла обнаружен поток с большой мутностью. Например, 15 мая 1962 г. на одной из вертикалей этого створа мутность в точках 0,2, 0,6 и 0,8 H была 0,31—0,55 *кг/м³*, а в точке 0,9 H — 32,2 *кг/м³* (рис. 29). Состав этой мутности характеризовали преобладающим содержанием мелких фракций с $d<0{,}01$ *мм* (в вышеприведенном примере 91,5%, табл. 25). Такое же явление было отмечено и при исследованиях, проводившихся в 1960 г. в створе № 24.

В условиях 1-го Тедженского водохранилища донный поток большой мутности затухает на относительно коротком расстоянии, что, возможно, связано с неблагоприятными гидравлическими условиями для его развития: высокой отметкой порога водосброса, относительно малыми расходами, пропускаемыми через водохранилища, узостью отверстия водосброса и большими напорами при пропуске сбросных расходов.

ТАБЛИЦА 24

Изменение мутности потока на участке Аул-Ата — Тедженстрой в 1962 г.

Дата	Мутность в створах, *кг/м³*				Расход в створах, *м³/сек*		Уровень в водохранилище ниже проектного, *м*
	Аул-Ата	№ 31	№ 20	Тедженстрой	Аул-Ата	Тедженстрой	
29/IV	10,70	6,015	0,101	0,022	142	100	1,72
3/V	27,60	22,987	0,169	0,0358	164	185	1,07
7/V	11,23	9,783	0,1503	0,0059	111,0	124	1,02
9/V	7,36	6,59	0,164	0,0244	85,7	124	0,96
14/V	25,577	22,80	—	—	80,7	113	0,92
15/V	36,25	29,22	0,130	0,00867	82,0	86	0,92
17/V	7,203	7,700	0,153	0,0050	57,4	77	0,90
22/V	2,779	3,311	0,046	0,016	40,6	66	0,97
В среднем	16,087	13,54	0,120	0,017			
	100%	84,0%	0,75%	0,1%			

ТАБЛИЦА 25

Изменение мутности потока на участке Аул-Ата — створ № 20 15/V 1962 г., *кг/м³*

Створ	Общая мутность, *кг/м³*	Фракции, *мм*						
		<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	0,10—0,15	>0,25
Аул-Ата	36,25	—	—	—	—	—	—	—
Створ № 31 водохранилища . . .	29,22	24,792 85,0	0,829 2,8	2,405 8,2	0,359 1,2	0,835 2,8	—	—
Створ № 20 водохранилища (0,9H)	32,162	29,38 91,5	1,936 6,0	0,544 1,7	0,216 0,6	0,086 0,2	—	—

ТАБЛИЦА 26

Мутности и транспортирующая способность потока на участке Аул-Ата — водохранилище

Дата	Створ	Общая мутность, кг/м³	Мутность $\left(\frac{кг/м^3}{\%}\right)$ по фракциям d, мм						w_{n+1}, мм/сек	$w_1 \cdot 10^{-9}$, мм/сек	v, м/сек	$i \cdot 10^{-3}$	$u_в$, мм/сек	$\rho_т$, кг/м³
			<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	>0,10						
22/IV 1960 г.	Аул-Ата	41,076	33,746	4,239	1,234	0,445	1,412	—	8,7	4,3	1,125	0,24	8,7	35,6
			82,15	10,32	3,01	1,08	3,44	—	—	—	—	—	—	—
22/IV 1960 г.	№ 32 (28,3 км ниже Аул-Ата)	32,525	—	—	—	—	—	—	8,7	4,3	1,125	0,24	8,7	35,6
24/IV 1960 г.	Аул-Ата	49,033	38,707	3,655	3,610	1,282	1,557	0,222	—	—	1,28	0,3	10,52	36,25
			78,92	7,47	7,37	2,62	3,17	0,45	8,86	130,0	—	—	—	—
24/IV 1960 г.	VII (18,4 км ниже Аул-Ата)	38,996	30,06	3,189	3,790	0,431	1,519	0,007	—	—	1,28	0,3	10,52	36,25
			77,20	8,18	9,72	1,00	3,90	—	—	—	—	—	—	—

ТАБЛИЦА 27

Мутность, транспортирующая способность потока и деформация дна в створе Аул-Ата в 1960 г.

Дата	Общая мутность, кг/м³	Удельное содержание фракции, мм			w_{n+1}, мм/сек	w_1, мм/сек	v, м/сек	$i \cdot 10^{-3}$	$u_в$, мм/сек	$\rho_т$, кг/м³	Деформация русла
		ρ_1 <0,01	ρ_2 0,01—0,05	ρ_3 >0,05							
3/V	83,90	0,812	0,147	0,041	16,0	$13 \cdot 10^{-6}$	1,58	0,3	13,1	51,6	Заиление
6/V	31,32	0,326	0,596	0,078	6,3	0,0185	1,62	0,3	13,4	14,98	»
11/V	8,042	0,088	0,656	0,256	18,40	0,058	1,07	0,3	8,74	7,04	Равновесие
13/V	4,47	0,18	0,667	0,153	12,8	0,053	0,87	0,3	7,01	5,45	Размыв
16/V	2,949	0,468	0,339	0,193	35,5	0,00013	0,78	0,3	6,24	12,20	»
21/V	24,612	0,531	0,353	0,116	14,1	0,00083	1,25	0,3	10,28	16,4	Заиление
30/V	3,339	0,156	0,523	0,321	41,0	0,028	0,67	0,3	5,31	4,5	Размыв

Гидромасса из мелких частиц наносов (в основном $d<0{,}015$—0,01 *мм*) обладает большей подвижностью и сползает по откосу дна, увеличенному ранее отложившимися наносами. Этим в значительной мере объясняется распространение заиления почти по всей длине водохранилища. Подобное явление (сползание осевших мелких частиц по откосу дна) наблюдалось также при проведении исследований по отстою наносов на крупномасштабной модели отстойника в голове Каракумского канала в 1958 г. [29].

§ 18. Транспортирующая способность речного потока

Режим взвешенных наносов р. Теджен характеризуется периодами с большими мутностями 30—40 (и даже 100) *кг/м*³ и преобладанием при этом в составе наносов частиц с $d<0{,}01$ *мм*, методика ВНИИГиМ [23] по расчету транспортирующей способности потока для подобных условий не была проверена.

В 1960 г. были проведены исследования динамики мутности р. Теджен на участке Аул-Ата — водохранилище. Измеренная мутность в конечном створе сопоставлялась с расчетной транспортирующей способностью потока, определяемой по формуле (9) (табл. 26). Эти данные показывают, что, когда фактическая мутность больше транспортирующей способности, наносы осаждаются и в конечных створах (на расстоянии 26,3 *км* и 18,3 *км*) мутность близка к расчетной (расхождение 7—9%). Осаждение происходит в основном за счет самой мелкой фракции ($d<$ $<0{,}01$ *мм*), которой поток перегружен.

Анализ русловых деформаций р. Теджен в створе Аул-Ата в 1960 г. показал, что, если фактическая мутность больше расчетной транспортирующей способности, происходит заиление, а если транспортирующая способность больше фактической мутности, русло размывается; когда же эти величины близки между собой, имеет место так называемое равновесие (отсутствие размыва и заиления, табл. 27).

Приведенные в таблицах 26 и 27 данные показывают, что методика ВНИИГиМ для расчета транспортирующей способности потока дает удовлетворительное совпадение с натурными данными и для вышеуказанных условий р. Теджен.

§ 19. Русловые процессы в реке и в чаше водохранилища

В начале водохранилища (на протяжении первых 2—3 *км*) средняя по ширине высота слоя отложений достигла в 1960 г. 5—6 *м* (рис. 30). Такое большое повышение дна вызывало

значительное удлинение участка распространения подпора вверх по течению. Первоначальная длина кривой подпора равнялась 21 *км*, а в 1962 г. общая длина кривой подпора достигала 41 *км*, т. е. увеличилась примерно в 2 раза. Уклоны свободной поверхности потока на участке Аул-Ата — водохранилище (створ № 31) снизились до 0,00025—0,00028 против 0,00045—0,00065 в бытовых условиях.

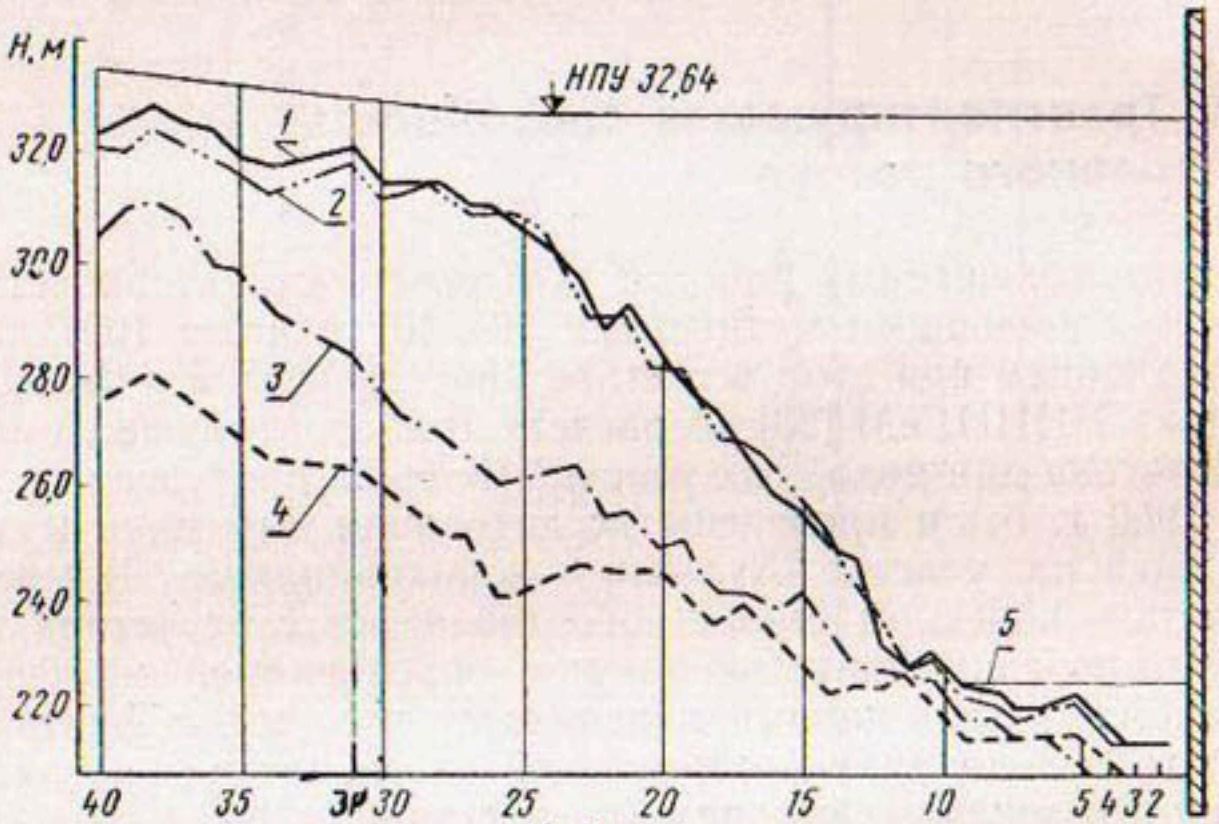


Рис. 30. Продольные профили дна 1-го Тедженского водохранилища:

1 — за 1960 г.; *2* — 1958 г.; *3* — 1954 г.; *4* — 1936 г.; *5* — отметка порога водосброса (22, 64).

Как показали съемки, проведенные в 1958 и 1960 гг., средние отметки дна в створе № 40 повысились в период 1954—1958 гг. на 1,5 *м*, а в период 1958—1960 гг. еще на 0,5 *м* (рис. 30). В створе Аул-Ата повышение дна после введения в эксплуатацию 1-го Тедженского водохранилища началось в 1955—1956 гг. За год средняя отметка дна после полного прекращения стока повысилась на 10 *см* (рис. 31), а в 1957 г. — на 0,8 *м*. К концу паводка 1958 г. отметки дна в створе Аул-Ата остались почти неизменными. Последующие 4 года были маловодными и характеризовались ранним прекращением стока; дно к концу паводка повышалось в среднем на 10 *см* в год. За период с 1955 по 1962 г. средняя отметка дна в створе Аул-Ата в результате выклинивания подпора повысилась примерно на 1,3 *м*.

Повышение отметки дна привело к тому, что выход потока на пойму в створе Аул-Ата происходит при гораздо меньшем расходе воды. Если, например, 3/IV 1956 г. выход потока на пойму

происходил при расходе 312 *м³/сек*, то 2—3/IV 1960 г. лишь при расходе 210 *м³/сек*, а 12/V 1962 г. — при расходе 190 *м³/сек*.

Повышению дна в начале чаши водохранилища (створ 40) за период 1954—1960 гг. на 2 *м* соответствовало повышение средней отметки дна в створе Аул-Ата на 1,26 *м*. Заиление самой чаши водохранилища в период между съемками, проведенными в марте—апреле 1958 г. и октябре—ноябре 1958 г., распределялось

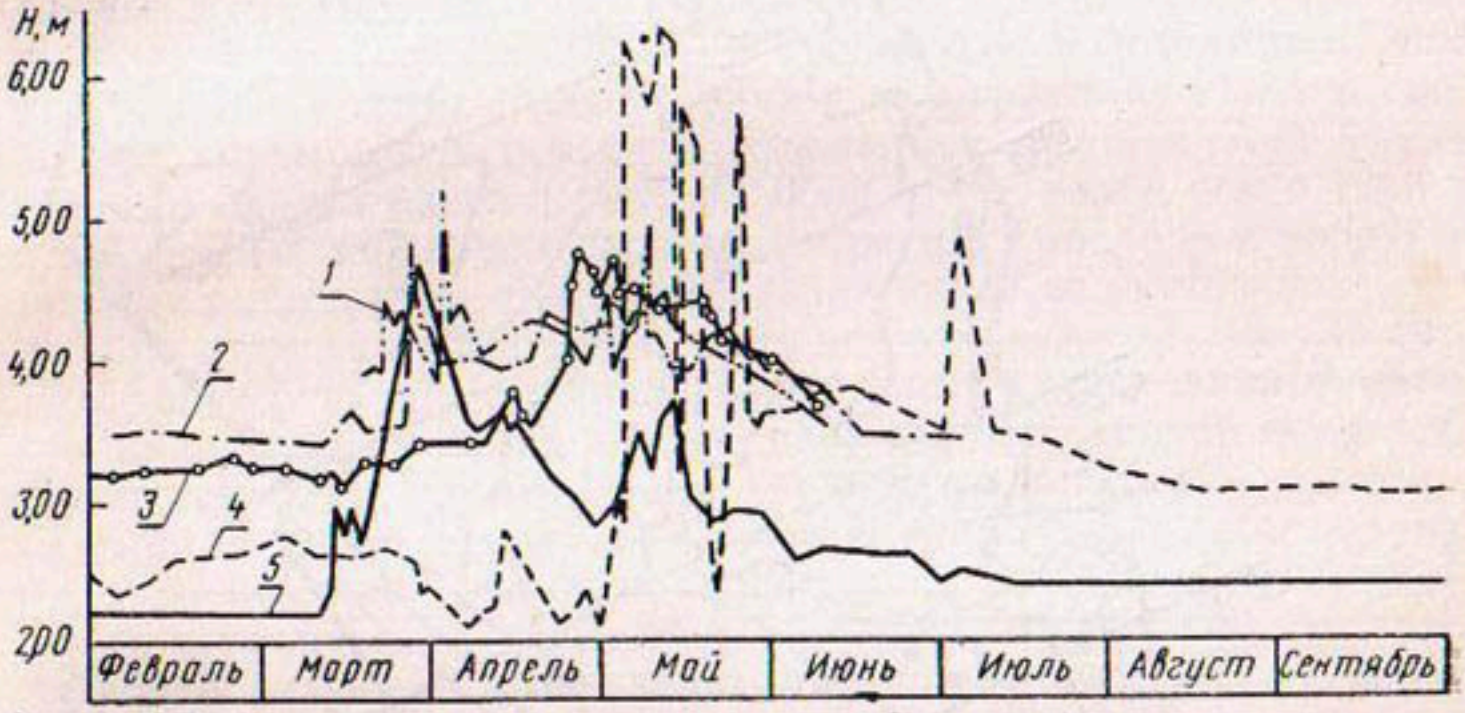


Рис. 31. Колебание средней отметки дна в створе Аул-Ата
1 — за 1964 г.; *2* — 1960 г.; *3* — 1962 г.; *4* — 1957 г.; *5* — 1955 г.

крайне неравномерно (табл. 28). Основная часть наносов осела на участке между створами 40 и 25. Характерно, что заиление распространялось почти на всю ширину водохранилища. На отдельных участках (створы 20—25) результирующей деформацией был размыв. Этот объем размыва следует отнести за счет

ТАБЛИЦА 28

Распределение заиления и размыва в чаше водохранилища в 1958—1960 гг., тыс. *м³*

Участок между створами	Длина участка, *м*	Заиление	Размыв
40—35	1250	+3031	
35—30	1250	+2013	
30—25	1250	+358	
25—20	1250	—	—9
20—15	1250	—	—307
15—10	1250	+184	
10—5	1250	+583	
5—1	1000	+69,6	
	Итого	6235,6	316,0

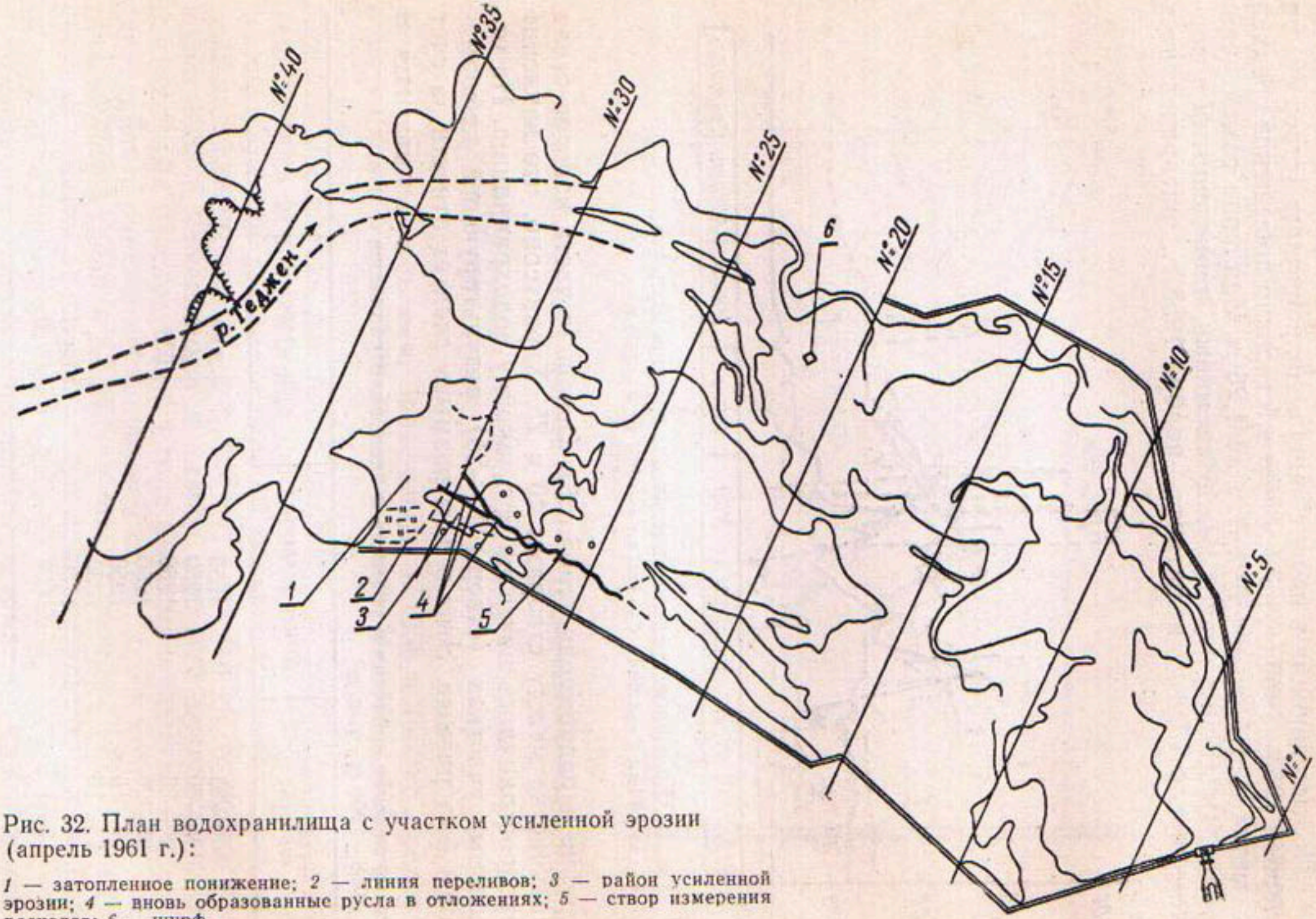


Рис. 32. План водохранилища с участком усиленной эрозии (апрель 1961 г.):

1 — затопленное понижение; *2* — линия переливов; *3* — район усиленной эрозии; *4* — вновь образованные русла в отложениях; *5* — створ измерения расходов; *6* — шурф.

смещения наносов на нижележащие участки при сработках горизонтов воды в водохранилище.

Уклоны свободной поверхности потока р. Теджен на участке между Аул-Ата и створом № 31 за период 1960—1962 гг. мало изменились и были в пределах 0,00025—0,00028 (табл. 29), а бытовые уклоны р. Теджен в этом районе 0,00045—0,0065.

Повышенное значение уклона, имевшее место в 1962 г., является следствием того, что уровень в водохранилище у плотины был при измерениях в 1962 г. в среднем на 0,69 *м* ниже, чем в 1960 г. При одинаковых уровнях в водохранилище уклон свободной поверхности потока р. Теджен на участке Аул-Ата — створ № 31 был равен в 1962 г. 0,000239, т. е. ниже, чем в 1960 г.

В связи с заилением русла р. Теджен на подходе к водохранилищу расход реки при прохождении пиков не умещался в русле и по отдельным протокам часть его отходила вправо. За счет этой части расхода заполнялись отдельные изолированные емкости на повышенных отметках, опережая наполнение основной, примыкающей к плотине части чаши водохранилища.

Весной 1961 г. при прохождении максимальных расходов была заполнена впадина у правобережной дамбы выше створа № 30, ограниченная повышенными участками рельефа, 16 апреля начался перелив из нее через отдельные понижения в отложениях.

Отдельные переливы образовывали протоки с большими уклонами и за сутки-двое разрабатывали себе русла, сходные по форме с оврагами и затем сливались в общее русло, проходящее почти параллельно правой дамбе на расстоянии 300—375 *м* от нее (рис. 32). По измерениям 20/IV 1961 г. в этом русле при ширине

ТАБЛИЦА 29

Уклоны свободной поверхности потока на участке Аул-Ата — водохранилище

Дата	Расход в створе Аул-Ата, *м³/сек*	Уровни воды (условные), *м*			Уклон свободной поверхности на участке Аул-Ата — створ № 31 10^{-3}	Примечание
		у плотины	в створе Аул-Ата	в створе № 31		
7/V 1960 г.	139	32,32	39,276	32,404	0,259	Средн. за 1960 г. 0,000248
9/V 1960 г.	113	32,35	38,976	32,652	0,238	
3/V 1962 г.	173	31,57	39,759	32,18	0,285	Средн. за 1962 г. 0,000265
7/V 1962 г.	111	31,62	39,249	32,19	0,265	
9/V 1962 г.	86	31,68	38,979	32,189	0,255	
14/V 1962 г.	81	31,72	38,979	32,230	0,254	

поверху 17,3 *м*, наибольшей глубине 2,5 *м* и скорости 0,86 *м/сек* проходил расход 16,2 *м³/сек*. Полная глубина размыва (с учетом обрыва 1,4 *м* над поверхностью потока) равнялась 3,9 *м*.

Средний уклон потока от залива до основной приплотинной части водохранилища у створа № 23 был 0,001—0,0012.

Наблюдения в 1962 г. показали, что в период наполнения водохранилища при расходах 160—200 *м³/сек* был заполнен ряд изолированных понижений на правом берегу выше водохранилища с уровнями воды в них, значительно превышающими таковой у плотины. Так, 8 мая 1962 г. при уровне воды у плотины на 0,96 *м* ниже проектного, в понижении у правой дамбы (створ № 40) уровень воды был на 2,14 *м*, а на правом берегу в створе III уровень в понижении был на 3,11 *м* выше уровня воды у плотины.

Высокие уровни воды в затопленной части правобережной поймы, близкие к отметкам окружающей местности, имевшие место при расходах 260—200 *м³/сек* (1960—1962 гг.) и при уровнях у плотины значительно ниже проектных, указывают на необходимость проведения защитных работ в этом районе. В противном случае по мере заиления водохранилища поток р. Теджен при расходах 400—500 *м³/сек* и близком к проектному уровню воды у плотины может обойти водохранилище с правой стороны. Кроме этого, опасно заполнение полуизолированных емкостей у правой дамбы за счет перелива потока из основного русла вправо при расходах более 250—270 *м³/сек*, что наблюдалось в 1961 г. Перелив и последующее движение воды по протокам из этих емкостей в основную чашу водохранилища поблизости от этой дамбы может привести к ее размыву.

Для предотвращения таких явлений в верхней части водохранилища и на подходах к нему необходимо расчистить и спрямить основное русло на участке между створом № 36 и створом V (протяженность 5—7 *км*);

повысить отметки и усилить правую дамбу выше створов 36—39, а также несколько удлинить ее;

разработать траншеи из полуизолированных емкостей у правой дамбы в сторону левого берега на участке выше створа № 30.

§ 20. Распределение по глубине взвешенных наносов в реке и объемный вес донных отложений

Измерение распределения взвешенных наносов р. Теджен по глубине потока проводилось в створе Аул-Ата в 1960 г. (5 раз), в 1961 г. (5 раз) и в 1962 г. (2 раза). Пробы на мутность по вертикалям отбирали в точках на расстоянии 0,2 *H*, 0,6 *H* и 0,8 *H* от

поверхности (H — глубина потока), трехлитровым вакуум-барометром. В большинстве случаев одновременно с отбором проб измеряли скорости воды при помощи вертушки Жестовского.

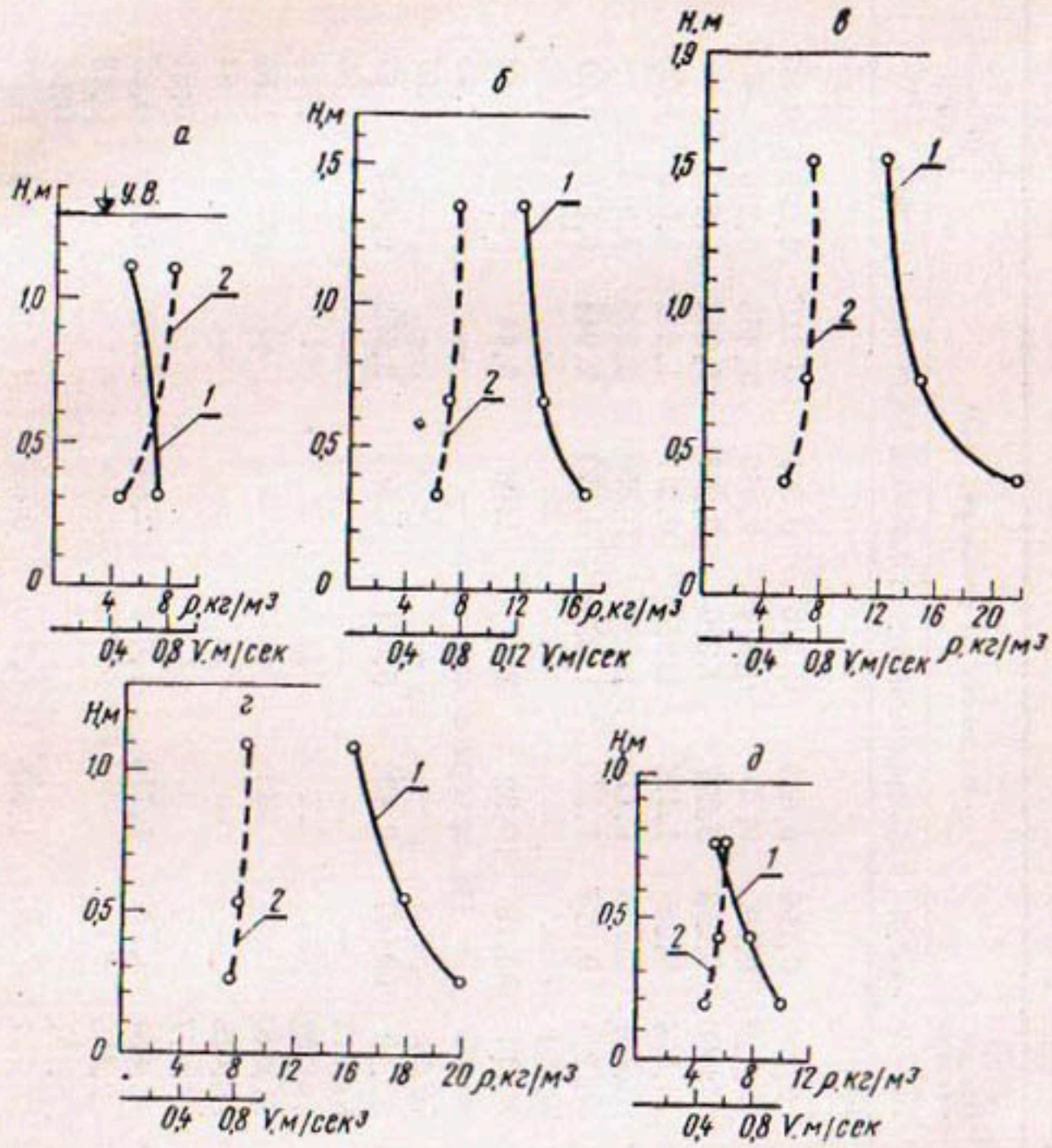


Рис. 33. Распределение по глубине взвешенных наносов и скорость течения воды р. Теджен в створе Аул-Ата, по данным измерений:

а — 27/V 1960 г. (вертикаль 8); *б* — 12/V 1961 г. (вертикаль 7); *в* — 12/V 1961 г. (вертикаль 12); *г* — 28/IV 1962 г. (вертикали 7 и 12); *д* — 11/V 1962 г. (вертикаль 9); *1* — $\rho = f(H)$; *2* — $v = f(H)$.

Исследования показали, что взвешенные наносы р. Теджен выше 1-го водохранилища, распределяются по глубине очень неравномерно и характеризуются увеличением мутности от поверхности ко дну (табл. 30, рис. 33). Средняя по всем измерениям мутность по глубине $0{,}2\,H$ равна 21,89 *кг/м*³, что составляет 83,4% от мутности на глубине $0{,}8\,H$, равной 26,27 *кг/м*³, и 91,7% от мутности на глубине $0{,}6\,H$, равной 23,69 *кг/м*³.

ТАБЛИЦА 30

Распределение мутности по глубине в р. Теджен (створ Аул-Ата)

Дата	Вертикаль	Глубина, м	Точка отбора	Общая мутность, кг/м³	Мутность по фракциям, кг/м³						Скорость воды, м/сек	Расход реки, м³/сек
					<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	>0,10		
1960 г. 12/IV	7—12	0,78	0,2H	2,224	0,296	0,683	0,370	0,071	0,715	0,089	0,85	29,8
			0,6H	3,122	0,290	0,70	0,374	0,089	1,453	0,216	—	29,8
			0,8H	4,090	0,263	0,817	0,379	0,087	1,954	0,590	—	29,8
19/IV	8,13	1,28	0,2H	4,034	0,280	1,124	1,271	0,277	1,042	0,040	1,05	47,7
			0,6H	5,661	0,295	1,113	1,392	0,350	2,295	0,216		47,7
			0,8H	6,768	0,274	1,232	1,325	0,383	2,944	0,610	0,91	47,7
22/IV	7—13	0,88	0,2H	45,20	—	—	—	—	—	—	1,55	74,0
			0,6H	48,10	82,15	10,32	3,01	1,08	3,44	—	1,44	74,0
			0,8H	49,40	(% содержание)			—	—	—	1,15	74,0
3/V	8	1,24	0,2H	78,91	—	—	—	—	—	—	1,87	157,0
			0,6H	83,90	68,097	2,432	5,671	4,264	2,952	0,484	1,67	157,0
			0,8H	88,713	—	—	—	—	—	—	1,39	157,0
3/V	12	1,45	0,2H	79,762	—	—	—	—	—	—	1,74	157,0
			0,6H	81,340	—	—	—	—	—	—	1,59	157,0
			0,8H	86,015	—	—	—	—	—	—	1,34	157,0
27/V	8	1,40	0,2H	4,977							0,81	47,6
			0,6H	6,854	0,731	1,710	1,018	0,681	2,506	0,208	0,68	47,6
			0,8H	7,166							0,48	47,6
27/V	14	0,90	0,2H	5,191							0,91	47,6
			0,6H	5,727	0,836	1,979	0,740	0,633	1,518	0,021	0,87	47,6
			0,8H	6,443	—	—	—	—	—	—	0,73	47,6

Продолжение

Дата	Вертикаль	Глубина, *м*	Точка отбора	Общая мутность, *кг/м³*	Мутность по фракциям, *кг/м³*						Скорость воды, *м/сек*	Расход реки, *м³/сек*
					<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	>0,10		
1961 г.												
27/IV	7—12	0,83	0,2H	4,199							1,25	53,6
			0,6H	4,542	0,639	1,513	0,838	0,383	1,161	0,008	1,04	53,6
			0,8H	5,890	—	—	—	—	—	—	0,84	53,6
8/V	7—11	1,13	0,2H	13,191	—	—	—	—	—	—	1,65	118,0
			0,6H	13,783	0,653	9,131	2,063	0,842	0,987	0,107	1,56	118,0
			0,8H	14,546	—	—	—	—	—	—	1,39	118,0
12/V	7	1,70	0,2H	12,168	—	—	—	—	—	—	1,47	135,0
			0,6H	13,597	—	—	—	—	—	—	1,37	135,0
			0,8H	16,685	1,150	5,225	3,024	2,079	4,610	0,597	1,24	135,0
12/V	12	1,90	0,2H	12,630	—	—	—	—	—	—	1,53	135,0
			0,6H	14,669	1,139	5,321	2,817	1,593	3,700	0,099	1,42	135,0
			0,8H	21,995	—	—	—	—	—	—	1,15	135,0
1962 г.												
28/IV	7—12	1,34	0,2H	16,446	—	—	—	—	—	—	1,73	123,0
			0,6H	19,803	0,707	9,53	2,832	2,591	4,101	0,042	1,65	123,0
			0,8H	23,872	—	—	—	—	—	—	1,50	123,0
11/V	9	0,95	0,2H	5,70	—	—	—	—	—	—	1,19	66,0
			0,6H	6,91	—	—	—	—	—	—	1,12	66,0
			0,8H	10,04	1,760	1,504	1,528	1,312	3,936	—	0,97	66,0

При прохождении снеговых паводков неравномерность распределения мутности по глубине потока еще больше, чем при ливневых паводках. Причина этого — увеличение содержания более крупных частиц в составе взвешенных наносов при снеговом паводке по сравнению с ливневым.

Для определения объемного веса отложений пробы брали в чаше водохранилища, в русле и пойме р. Теджен. В чаше водохранилища отбирали пробы с поверхности обнажившихся отмелей и из шурфа открытого между створами № 25 и № 22 (500 *м* от левого берега). Для фракционного анализа донных отложений из-под воды (без определения объемного веса) отбор проб производили при помощи трубки $d=3/4''$. Для определения фракционного состава и объемного веса в русле и пойме р. Теджен также отбирали пробы с поверхностного слоя донных отложений.

Исследования показали, что при осаждении в водохранилище мелких наносов, которые находятся под водой, объемный вес их в поверхностном слое равен 0,66—0,68 *т/м*³, на глубине 0,4—0,5 *м* — 0,86—0,88 *т/м*³, а на глубине 0,7—1,0 *м* — 0,95—1,28 *т/м*³ (табл. 31). При увеличении крупности осажденных наносов содержание частиц $d<0{,}015$ *мм* уменьшилось до 1,2—6,4%; объ-

ТАБЛИЦА 31

Объемный вес и состав донных отложений

Дата отбора проб	Место отбора проб	Фракционный состав, %			Объемный вес, *т/м*³
		<0,015	0,015—0,05	>0,05, *мм*	
31/V—2/VI 1960 г.	Створ № 27 $h=0{,}1$—$0{,}25$ *м*	63,66	30,82	5,52	0,66—0,68
31/V 1960 г.	Створ № 27, $h=0{,}7$—$1{,}0$ *м*	56,08	35,90	8,02	0,95—1,28
8/V 1961 г.	Створ № 24, $h=0{,}15$ *м*	6,44	58,00	35,56	0,94
8/V 1961 г.	Створ № 24, $h=0{,}65$	1,22	23,38	75,4	1,26
27/V 1960 г.	Створ Аул-Ата, $h=0{,}10$ *м* (10 дней после обнажения)	61,68	38,12	8,2	
27/V 1960 г.	То же, спустя 1 месяц после обнажения				1,38
9/VI 1960 г.	То же (сильно высохшие плитки)				1,875
Октябрь 1960 г.	Шурф у начала формирования русла в водохранилище, $h=0{,}20$—$2{,}50$ *м*				1,02—1,51
3/V 1962 г.	Створ № 31, $h=0{,}10$ *м*	0,48	5,411	94,08	—
3/V 1962 г,	Створ № 27, $h=0{,}10$ *м*	17,20	40,56	42,24	—
	Створ № 24, $h=0{,}10$ *м*	15,92	44,78	39,30	—
26/V 1960 г.	Обнажившиеся отмели в начале водохранилища при его сработке, $h=0{,}10$ *м*	9,92	66,28	23,8	1,46—1,48
1960—1962 гг.	Отложения в русле р. Теджен, $h=0{,}10$ *м*	2—15	5—68	30—80	1,41—1,70

емный вес увеличился в верхнем слое до 0,94 *т/м*³, а на глубине 0,65 *м* до 1,26 *т/м*³ (табл. 31).

Объемный вес отложений в русле р. Теджен, характеризующихся относительно большим содержанием песчаных частиц 1,41—1,70 *т/м*³. Объемный вес отложений на пойме р. Теджен, состоящих в основном из мелких частиц ($d<0{,}015$ *мм* — 62%), резко меняется в зависимости от их влажности; через десять дней после обнажения он равнялся 1,20 *т/м*³, через месяц — 1,38 *т/м*³; объемный вес высохшего и растрескавшегося слоя — 1,88 *т/м*³. Отложения из обнажившихся отмелей в верхней части водохранилища имели объемный вес 1,46—1,48 *т/м*³, а отложения из шурфа — 1,02—1,51 *т/м*³ (табл. 31).

На основании полученных данных средний объемный вес отложений в 1-м Тедженском водохранилище принят равным 1,45 *т/м*³.

§ 21. Мероприятия по сокращению заиления 1-го Тедженского водохранилища

Водосбросные сооружения 1-го и 2-го Тедженских водохранилищ были рассчитаны на пропуск расхода 580 *м*³/*сек*. В период эксплуатации 1956—1957 гг. расходы были более 660—690 *м*³/*сек*. Проведенные после 1958 г. гидрологические расчеты с использованием 30-летнего ряда наблюдений по стоку и расходам показали, что максимальный расход 0,1% обеспеченности составляет 1092 *м*³/*сек*, а 0,5% обеспеченности — 887 *м*³/*сек*. По существующим условиям по руслу р. Теджен ниже водохранилищ можно безопасно пропускать расходы 260—300 *м*³/*сек*. Пропуск более высоких расходов угрожает городам Теджен и Кировск, а также железной дороге. В связи с этим по заданию Министерства водного хозяйства Туркменской ССР в 1960—1961 гг. составлялось проектное задание паводкового водосброса выше 1-го Тедженского водохранилища в районе створа Аул-Ата. Трасса водосброса пролегала по междуречью Теджен-Мургаб, мимо Хауз-Ханского водохранилища (рис. 34). Сбросной сток частично должен аккумулироваться в Хауз-Ханском водохранилище, частично пропускать по дюкеру под железной дорогой и сбрасываться в пески.

Для уменьшения дополнительных подпоров наиболее целесообразным будет сооружение головного узла водосбросного канала — бесплотинным, с минимальным объемом регулировочных работ в русле р. Теджен. Отметка порога регулятора водосброса должна быть на уровне дна реки, ширина регулятора в свету 60 *м* (5 пролетов по 12 *м*). Водосброс будет полностью включаться в работу только после наполнения обоих водохранилищ и пропускать все расходы реки за вычетом потребных на орошение.

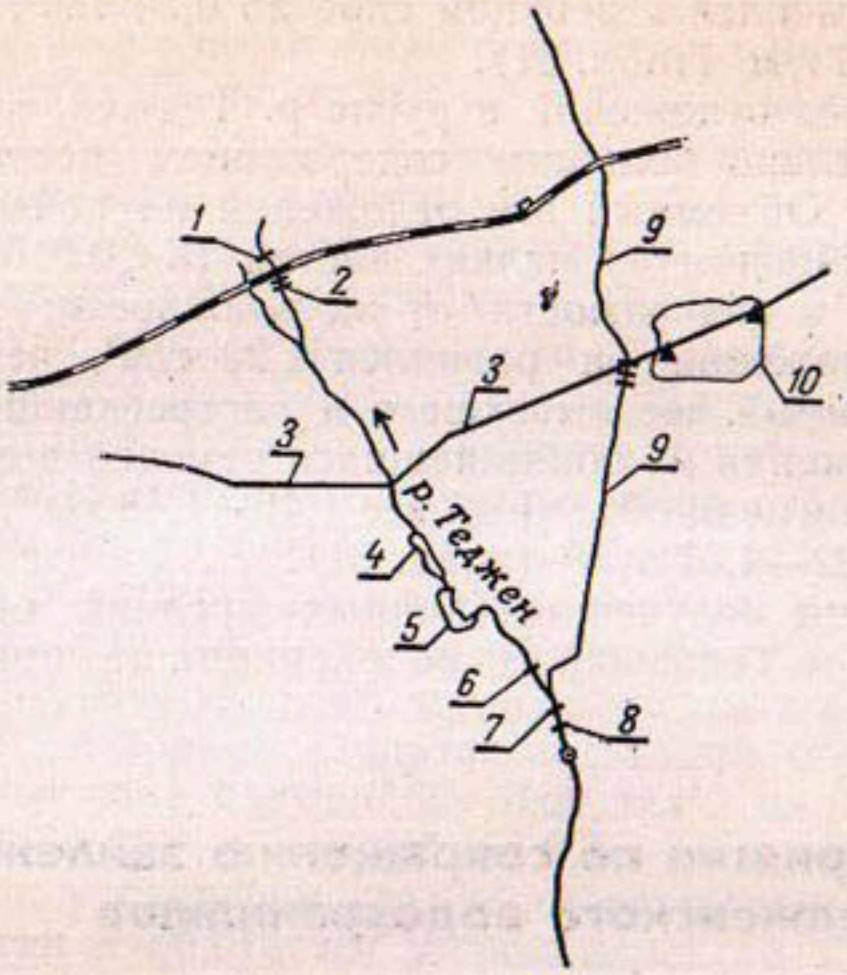


Рис. 34. План трассы паводкового водосброса:

1 — плотина Карры-Бент; *2* — г. Теджен; *3* — Каракумский канал; *4* — 2-е Тедженское водохранилище; *5* — 1-е Тедженское водохранилище; *6* — створ Аул-Ата; *7* — створ водосбросного узла; *8* — створ Ата-Яб; *9* — трасса паводкового водосброса; *10* — Хауз-Ханское водохранилище.

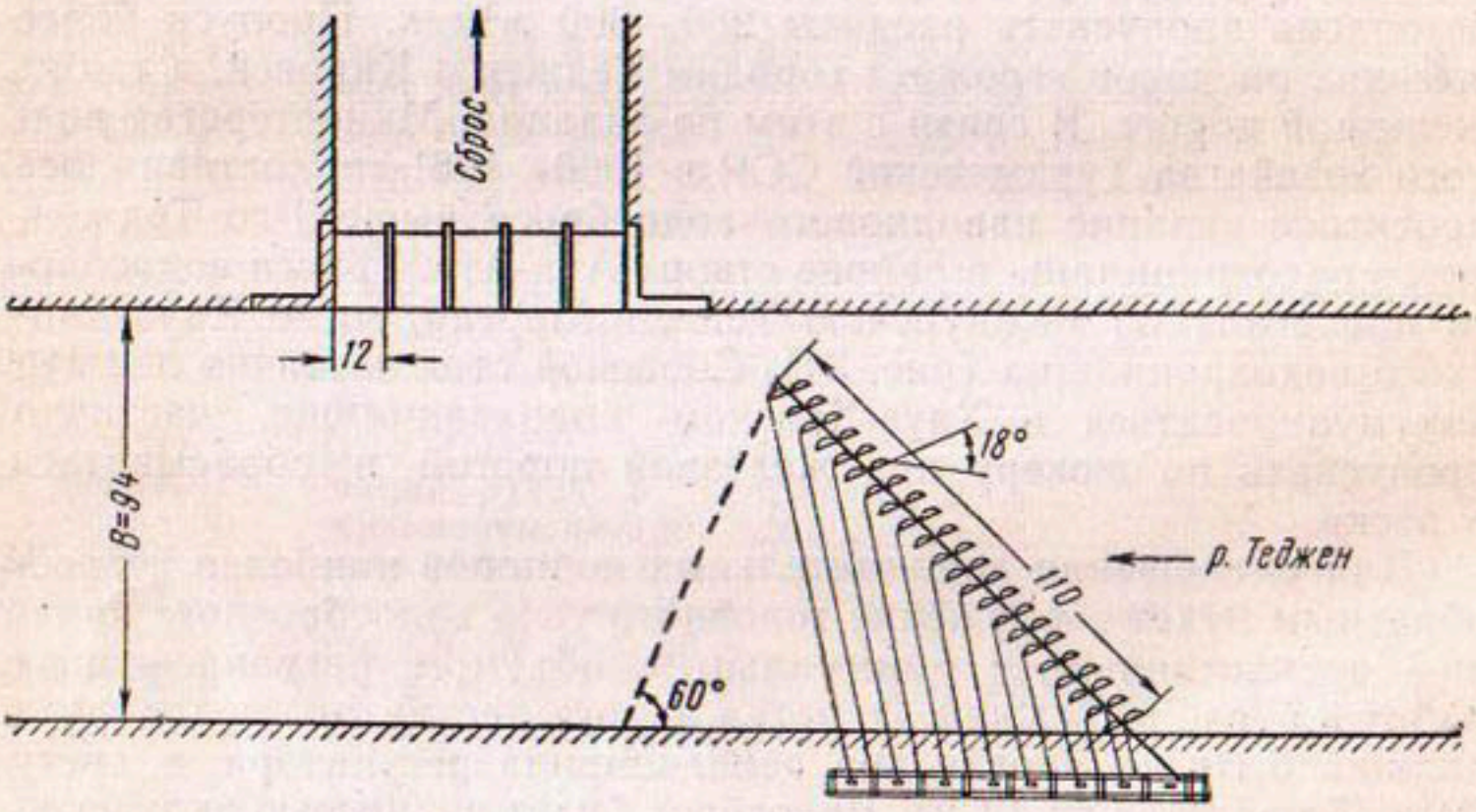


Рис. 35. Расположение струенаправляющей системы перед входом в паводковый водосброс.

Общий сток взвешенных наносов, поступающих в настоящее время в водохранилище в среднем при $\gamma_н = 1{,}45$ $т/м^3$, составляет:

$$V_в = \frac{0{,}015 \cdot 719 \cdot 10^6}{1000 \cdot 1{,}45} = 7{,}45 \text{ млн. } м^3.$$

Принимая объем донных наносов равным 10% стока взвешенных наносов получим:

$$V_д = \frac{7{,}45 \cdot 10}{100} = 0{,}745 \text{ млн. } м^3.$$

Общий сток наносов р. Теджен выше водохранилища составит:

$$V = 7{,}45 + 0{,}75 = 8{,}2 \text{ млн. } м^3.$$

По подсчетам Туркменгипроводхоза, сбросной сток составляет в среднем 28% от общего стока р. Теджен в створе Аул-Ата. При пропорциональном распределении наносов между водохранилищами и сбросом в последний поступит $8{,}2 \times 0{,}28 = 2{,}3$ млн. $м^3$ наносов, а в водохранилище — 5,9 млн. $м^3$ в год.

Расположение водосбросного сооружения создает условия бокового отвода потока. При этом поступление наносов в 1-е Теджекское водохранилище должно быть значительно меньшим. Объем поступающих в водохранилище наносов может быть еще более сокращен при установке перед входом в сброс струенаправляющей системы (рис. 35). По опыту работы струенаправляющих систем, а также на основании приведенных исследований по распределению мутности на глубине потока р. Теджен можно предположить, что при устройстве такого водосброса объем наносов, поступающих в водохранилище, сократится на 3 млн. $м^3$ в год.

§ 22. Ширина поверху формируемого потока русла и форма его поперечного сечения

Основным фактором, определяющим воздействие потока на русло, является гидравлическое трение или касательное напряжение на стенке, для широких русел — донное касательное напряжение.

Величина донного касательного напряжения τ_0 для широких русел определяется по формуле:

$$\tau_0 = \gamma H i. \qquad (226)$$

При квадратичном законе сопротивлений и при скоростном коэффициенте $C = \frac{1}{n} H^{1/6}$:

$$i = \frac{v^2}{C^2 H} = \frac{Q^2}{B^2 H^2 \left(\frac{1}{n} H^{1/6}\right)^2 H} = \frac{Q^2 n^2}{B^2 H^2 H^{2/3} H} = \frac{Q^2 n^2}{B^2 H^{11/3}};$$

$$B^2 = \frac{Q^2 n^2}{H^{11/3} i}; \quad B = \frac{Qn}{H^{11/6} \sqrt{i}},$$

где H — средняя глубина потока; при $Q = \text{const}$, $H = \text{const}$, $B = \frac{A}{\sqrt{i}}$.

Многочисленными исследованиями установлено, что при $i = \text{const}$, $H = \text{const}$, $B = \alpha\sqrt{Q}$. На основании вышеизложенного зависимость ширины формируемого потоком русла, от расхода Q и уклона i, будет иметь следующий вид:

$$B = f\left(\sqrt{\frac{Q}{i}}\right). \tag{227}$$

Обработка данных исследований рр. Аму-Дарьи, Вахш, Мургаб, Теджен, Кушки, Кашан позволила установить следующие зависимости для определения ширины русла, формируемого потоком в отложениях.

Для Аму-Дарьи и устьевого участка р. Вахш:

$$B = 0{,}16 \sqrt{\frac{Q}{i}}. \tag{227а}$$

Для среднего течения р. Вахш (Туткаул — головное сооружение Вахшского магистрального канала):

$$B = 0{,}14 \sqrt{\frac{Q}{i}}. \tag{227б}$$

Для рр. Теджен, Мургаб, Кушка, Кашан, каналов из Аму-Дарьи:

$$B = 0{,}10 \sqrt{\frac{Q}{i}}. \tag{227в}$$

Коэффициенты в этих формулах подобраны по данным непосредственных измерений расхода, уклона и ширины поверху рек и каналов.

Глубину при известной ширине определяют по формуле удельного расхода q, в которой скоростной коэффициент принимают, по Маннингу, $C = \frac{1}{n} H^{1/6}$.

$$q = v_{ср} H_{ср} = \frac{1}{n} H_{ср}^{1/6} \sqrt{H_{ср} i}\, H_{ср} = \frac{1}{n} H_{ср}^{7/3} \sqrt{i H_{ср}} =$$

$$= \frac{1}{n} H_{ср}^{5/3} \sqrt{i} \text{ или } H_{ср}^{5/3} = \frac{nq}{\sqrt{i}},$$

откуда

$$H_{ср} = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}}\right)^{3/5}. \quad (228)$$

Рекомендуемые коэффициенты в формулах для определения ширины и средней глубины русла, формируемого потоком, подобраны для рек и каналов, транспортирующих значительное количество взвешенных наносов. Поэтому величины средних скоростей и донных касательных напряжений получаются более высокими, чем допускаемые для материала дна («непередвигающие» скорости).

В соответствии с геоморфологическими особенностями и наносным режимом данной реки, группы рек, бассейна поток формирует себе русло с шириной и глубиной, определяемыми расходом и уклоном, что подтверждается натурными данными (рис. 36).

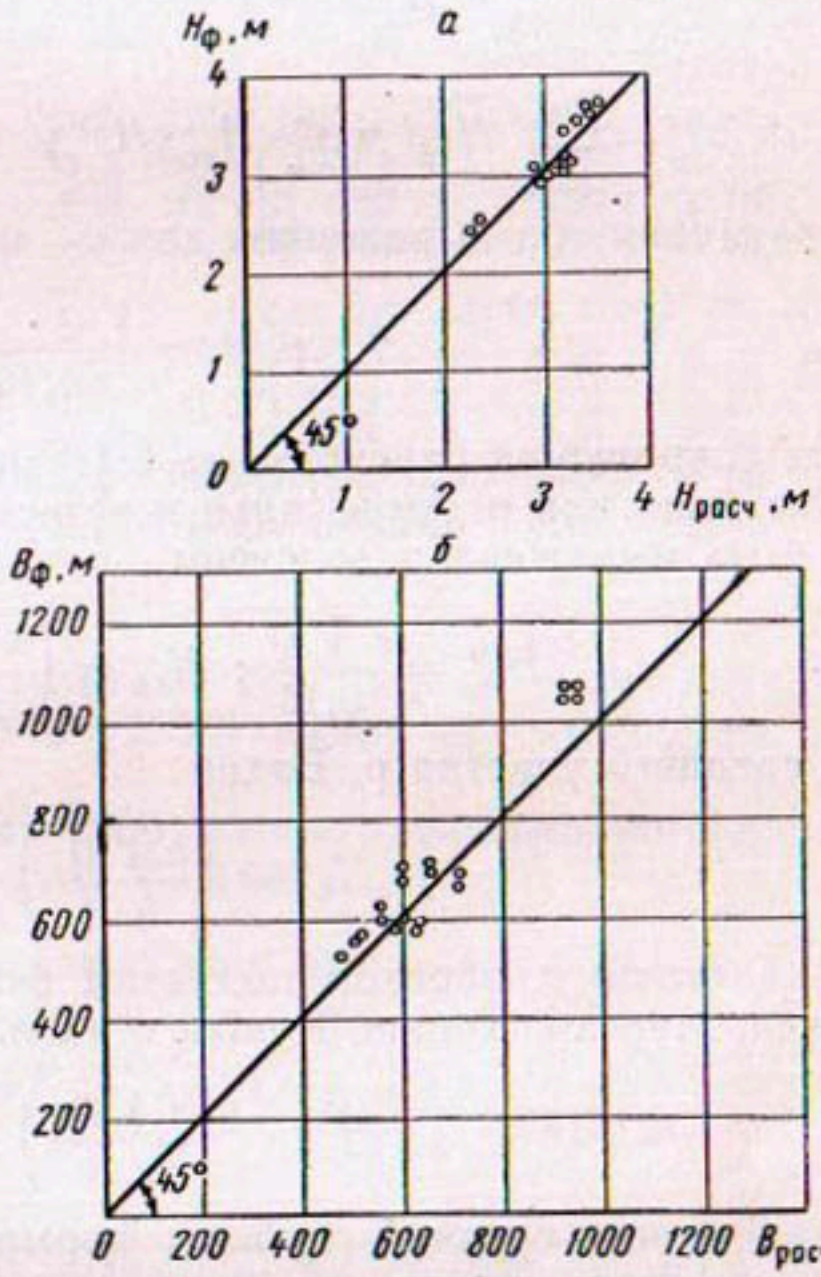


Рис. 36. Ширина и глубина р. Аму-Дарьи в створе Ильчик:

$$а - H_р = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}}\right)^{3/5}; \quad б - B_{(р)} = 0{,}16 \sqrt{\frac{Q}{\sqrt{i}}}$$

(линией обозначены расчетные величины, а точками — измеренные в 1957—1958 гг.).

Дальнейший анализ формул (227а)—(227в) и (228) показал, что глубина при ширине, определяемой по первым трем формулам, может быть представлена в виде $H_{ср} = f(Q, n)$, т. е. зависит от расхода и шероховатости, а не от уклона.

Средняя скорость потока для условий рр. Аму-Дарьи, Вахш может быть выражена:

$$v_{ср} = \frac{Q}{bH} = \frac{Q\sqrt{i}}{0{,}16\sqrt{Q}\cdot H} = \frac{\sqrt{Q}\cdot\sqrt{i}}{0{,}16\,H}.$$

В то же время, принимая скоростной коэффициент C по формуле Маннинга $\left(C = \frac{1}{n} H_{ср}^{1/6}\right)$, получают из формулы Шези для широких русел:

$$v_{ср} = C\sqrt{H_{ср} i} = \frac{1}{n} H_{ср}^{1/6}\cdot H^{1/2}\sqrt{i} = \frac{1}{n} H_{ср}^{2/3}\sqrt{i}.$$

Приравнивая оба выражения, для $v_{ср}$ находим:

$$\frac{1}{n} H_{ср}^{2/3}\sqrt{i} = \frac{\sqrt{Q}\cdot\sqrt{i}}{0{,}16\,H}.$$

После сокращения равенства на $\sqrt{i}$ и некоторых преобразований глубина для р. Аму-Дарьи и устьевого участка р. Вахш может быть выражена равенством

$$H_{ср}^{3/3} = \frac{n\sqrt{Q}}{0{,}16};\quad H_{ср} = \left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}16}\right)^{3/5}. \qquad (229а)$$

Для среднего участка р. Вахш:

$$H_{ср} = \left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}14}\right)^{3/5}. \qquad (229б)$$

Аналогичным образом получают формулу глубин для рек Теджен, Мургаб, Кушка, Кашан и каналов из р. Аму-Дарьи:

$$H_{ср} = \left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}10}\right)^{3/5}. \qquad (229в)$$

Независимость средней глубины формируемого потоком русла от уклона подтверждается данными измерений. В таблице 32 приведены величины глубины воды в створе Ильчик и Чатлы на р. Аму-Дарье и р. Вахш в створе головного сооружения Вахшского магистрального канала. Несмотря на то что уклон реки в створе Ильчик в 1,5 раза больше, чем в створе Чатлы, глубины при одинаковых или близких между собой расходах почти одинаковы. При прохождении расходов, близких к среднепаводковым в этих створах, глубины в р. Вахш были намного больше, чем в створе Ильчик Аму-Дарьи, хотя уклоны этого района р. Вахш в 8—10 раз больше, чем в р. Аму-Дарье. Следует учесть, что согласно (229а) и (229б) глубина зависит от расхода в степени 0,3, кроме этого, меньшие расходы в р. Вахш компенсируются значительно большими коэффициентами шероховатости русла этой реки по сравнению с р. Аму-Дарьей.

ТАБЛИЦА 32

Средние глубины р. Аму-Дарьи в створе Ильчик и Чатлы и р. Вахш
(по гидрологическим ежегодникам)

Дата	Расход, Q, $м^3/сек$	Глубина		Дата	Расход Q, $м^3/сек$	Глубина	
		$H_{ср}$, $м$	H_{max}, $м$			$H_{ср}$, $м$	H_{max}, $м$
р. Аму-Дарья, створ Ильчик				р. Вахш, головное сооружение магистрального канала			
27/VI 1957 г.	4000	3,85	7,0	31/V 1957 г.	886	3,57	6,6
8/VII 1957 г.	3230	3,07	6,5	24/VI 1957 г.	1010	4,04	7,3
26/VIII 1957 г.	2650	3,31	8,3	20/VIII 1957 г.	1180	4,15	7,4
				24/VIII 1957 г.	899	3,53	6,4
				р. Аму-Дарья, створ Чатлы			
4/V 1958 г.	3150	2,15	7,9	22/V 1958 г.	2940	2,32	3,90
21/VI 1958 г.	4680	2,62	6,7	17/VI 1958 г.	2580	2,18	4,20
30/VI 1958 г.	4740	2,75	5,0	21/VII 1958 г.	5940	2,84	6,0
8/VII 1958 г.	5710	2,88	5,4	18/VII 1958 г.	4940	2,59	5,5
13/VII 1958 г.	6160	3,04	5,10	14/VII 1958 г.	4710	2,54	5,2
14/VII 1958 г.	5060	2,67	5,4				

Насколько близкие результаты дает определение глубин потока по формулам (229а) и (229б) видно из следующих примеров.

1. Река Вахш, головное сооружение магистрального канала, 20/VIII 1957 г. $v_{ср}=2{,}71$ $м/сек$ $i=0{,}0022$.

$$n=\frac{H^{2/3}\sqrt{i}}{v}=\frac{4{,}15^{2/3}\sqrt{0{,}0022}}{2{,}71}=0{,}0446;$$

$$H_{ср}=\left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}14}\right)^{3/5}=\left(\frac{0{,}0446\sqrt{1180}}{0{,}14}\right)^{3/5}=4{,}20\ м,$$

в натуре $H_{ср}=4{,}15$ $м$.

2. Реки Аму-Дарья, створ Ильчик, 27/VI 1957 г. $v=1{,}5$ $м/сек$; $i=0{,}000224$.

$$n=\frac{H^{2/3}\sqrt{i}}{v}=\frac{3{,}85^{2/3}\sqrt{0{,}000224}}{1{,}5}=0{,}0245;$$

$$H_{ср}=\left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}16}\right)^{3/5}=\left(\frac{0{,}0245\sqrt{4000}}{0{,}16}\right)^{3/5}=3{,}90\ м,$$

в натуре $H_{ср}=3{,}85$ $м$.

Удовлетворительное совпадение величин, определенных по зависимости (227а), (227б) и (227в), с натурными данными подтверждается большим количеством примеров (рр. Аму-Дарья, Теджен, Вахш, каналы Таш-Сака и Каракумский). В частности, удовлетворительное совпадение расчетных (по формуле 227в)

и измеренных значений ширине потока получено для русел, формируемых потоком при заилении Келифских озер на трассе Каракумского канала и в заиленной части чаши 1-го Тедженского водохранилища.

По данным З. И. Шаровой (глава IV § 26), сформировавшееся в отложениях озера Двадцатка после заиления русло имело

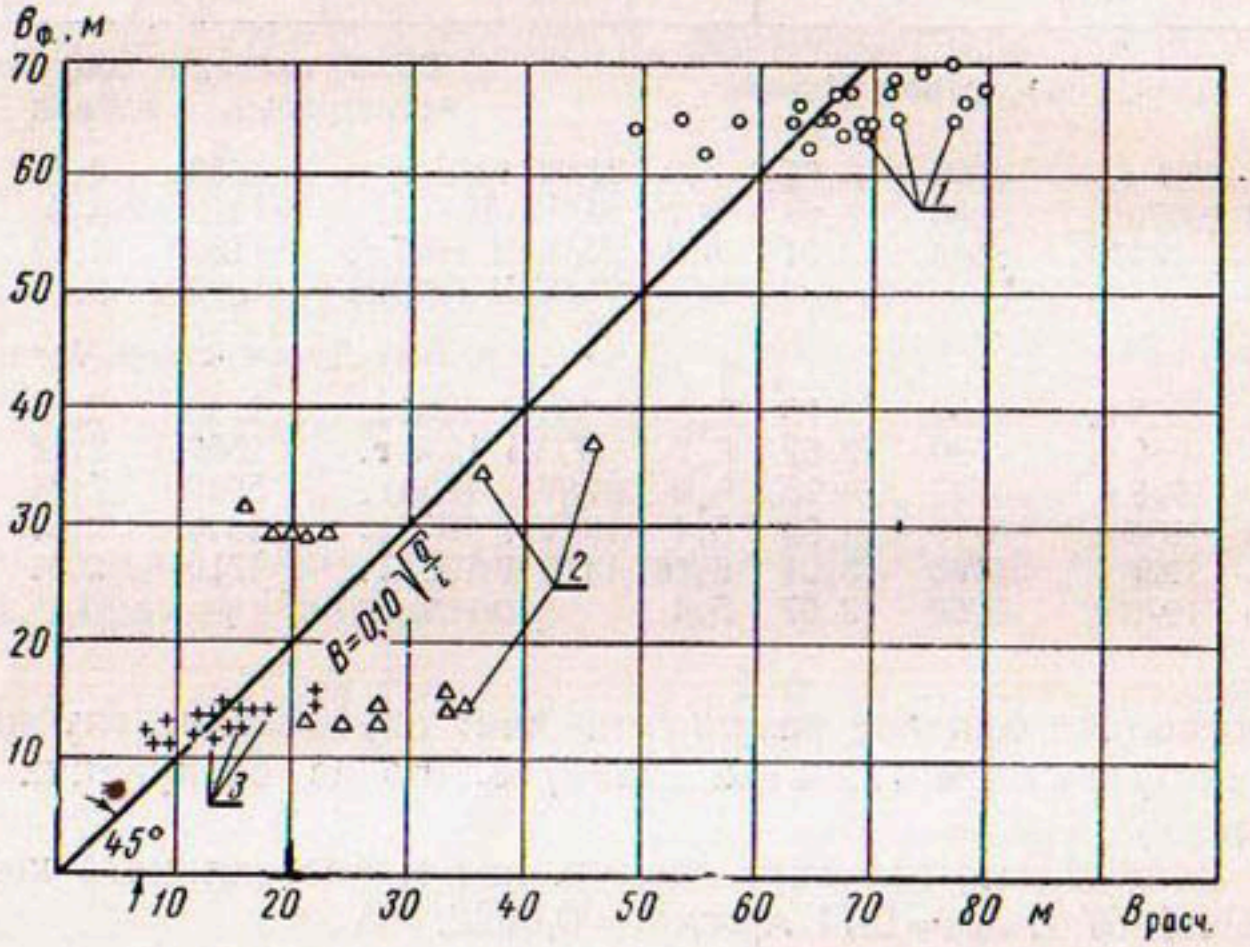


Рис. 37. Измеренная и расчетная ширина русел рек:
1 — Мургаб $Q_ф \geqslant 150$ *м³/сек*; *2* — Кушка $Q_ф \geqslant 45$ *м³/сек*; *3* — Кашан $Q_ф \geqslant 30$ *м³/сек*.

ширину поверху $B=76{,}0$ *м*, при средней глубине $H_{ср}=1{,}54$ *м*, уклоне $i=0{,}000245$, средней скорости $v=1{,}22$ *м/сек*, коэффициенте шероховатости $n=0{,}017$ и расходе $Q=143{,}0$ *м³/сек*.

По формуле (227в) расчетная ширина поверху равна

$$B_{расч}=0{,}10\sqrt{\frac{Q}{i}}=0{,}10\sqrt{\frac{143}{0{,}000245}}=76{,}5\ м,$$

а по формуле (229в) расчетная средняя глубина равна

$$H_{расч}=\left(\frac{n\sqrt{Q}}{0{,}10}\right)^{3/5}=\left(\frac{0{,}017\cdot 143}{0{,}10}\right)^{3/5}=1{,}53\ м.$$

Ширина русла, сформированного потоком в заиленной части 1-го Тедженского водохранилища (створ № 31), по промеру 9/V 1962 г. составляла 62 *м* при расходе 65,5 *м³/сек* и уклоне сво-

бодной поверхности потока $i = 0{,}000185$. По зависимости (227в) ширина русла получилась

$$B = 0{,}10\sqrt{\frac{65{,}5}{0{,}000185}} = 59{,}5\ м.$$

На рисунке 37 для рр. Мургаб, Кушка, Кашан сопоставлена расчетная ширина потока с фактической. Как видно из этого рисунка, для широкого диапазона расходов и ширин русла зависимость (227в) дает удовлетворительные результаты. Большое значение для расчетов русловых процессов имеет выбор расчетного или руслоформирующего расхода $Q_ф$. На формирование русла оказывают влияние расходы достаточной величины и достаточной длительности прохождения. Для рек с относительно небольшими колебаниями расходов в период прохождения паводка (реки ледникового питания: Аму-Дарья, Вахш) расчетный расход для определения ширины формируемого русла можно принять равным среднепаводковому за период май — август месяцы. При резких колебаниях расходов в период паводка (реки, у которых паводок проходит за счет таяния снегов, с большим влиянием атмосферных осадков) за расчетный руслоформирующий расход следует принимать не меньше расхода 10-процентной обеспеченности. Так, для р. Мургаб руслоформирующие расходы больше 150 $м^3/сек$, для р. Кушки — 45 $м^3/сек$ и для р. Кашан — 30 $м^3/сек$.

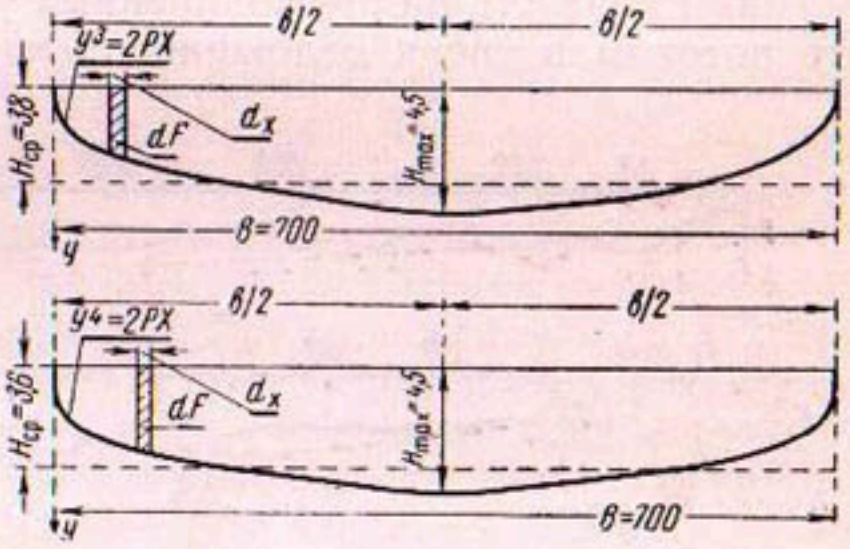


Рис. 38. Форма поперечного сечения русла, формируемого потоком на прямолинейных участках.

Форма поперечного сечения русла, формируемого потоком в своих отложениях, на прямых участках близка к кривым, построенным по уравнениям парабол третьей (230а) или четвертой (230б) степени (рис. 38).

$$1.\ y^3 = 2PX. \qquad (230а)$$

$$2.\ y^4 = 2PX \qquad (230б)$$

При русле с формой, очерченной по кубической параболе:

$$H_{max}^3 = 2P\frac{B}{2};\quad P = \frac{H_{max}^3}{B};\quad y^3 = \frac{2H_{max}^3}{B}\cdot x;$$

$$y = \frac{\sqrt[3]{2}\,H_{max}}{B^{1/3}}\cdot x^{1/3};\quad dF = ydx = \frac{\sqrt[3]{2}\,H_{max}}{B^{1/3}}\cdot x^{1/3}dx;$$

$$F=2\int_0^{\frac{B}{2}}\frac{\sqrt[3]{2}\,H_{max}}{B^{1/3}}\cdot x^{1/3}\,dx=\frac{3}{4}H_{max}\cdot B;\quad H_{ср}=\frac{3}{4}H_{max}.$$

Аналогичным образом для русла с очертанием по параболе четвертой степени:

$$H_{ср}=0{,}8\,H_{max}. \qquad (231)$$

Таким образом, на прямолинейных участках русла, формируемые потоком в своих отложениях, характеризуются близкими

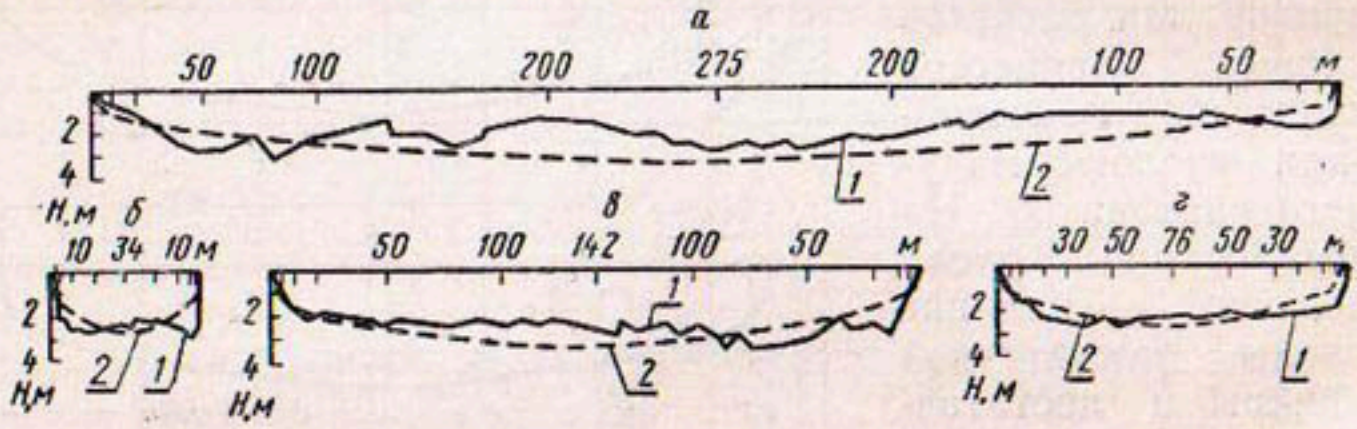


Рис. 39. Фактические и расчетные поперечные сечения русла, формируемые потоком:

1 — натурные очертания русла; *2* — формы русел, рассчитанные по кубической параболе; *а* — р. Аму-Дарья, створ Бассага за 28/IV 1951 г.; *б* — р. Теджен, створ Аул-Ата 5/IV 1961 г.; *в* — р. Аму-Дарья, створ Бассага правое русло за 8/V 1958 г.; *г* — Таш-Сака за 26/VIII 1960 г.

к равномерному распределением глубин по ширине. Соотношение между средней и максимальной глубинами находится в пределах 0,75—0,80. Такое распределение глубин влечет за собой также близкое к равномерному распределение скоростей и мутности по ширине потока. В связи с этим проведение русловых расчетов по осредненным величинам глубин, скорости и мутности не приводит к сколько-нибудь заметным погрешностям.

На рисунке 39 приведены расчетные (параболические) и фактические поперечные сечения русел рр. Аму-Дарьи, Теджен и канала Таш-Сака. Как видно из этого рисунка, отклонения фактического русла от расчетного относительно невелико и являются следствием некоторой искривленности русел в плане.

§ 23. Методика расчета сроков заиления водохранилищ и выклинивания подпора

Разрабатывать методы расчета заиления водохранилища начали в основном после 1930 г. При этом задача сводилась к определению срока заиления водохранилища. Для этой цели Тэйлор, Орт и другие исследователи предложили формулы типа:

$$V_t = V' \cdot a^t, \qquad (232)$$

где V_t — незаиленный объем водохранилища после t лет его эксплуатации;

V' — полный объем водохранилища;

$a = \left(1 - \frac{V_н}{V'}\right)$; $V_н$ — годовой объем стока наносов.

Наиболее полно методику определения срока заиления водохранилищ по формуле указанного типа дал Г. И. Шамов [28]. В дальнейшем в методику расчета Г. И. Шамова были внесены дополнения в отношении определения величины a в зависимости (232).

С. Т. Алтунин [3] и И. А. Бузунов предложили метод расчета срока заиления водохранилищ, основанный на совместном применении формул для определения элементов самоформирующихся русел и транспортирующей способности потока. По этому методу период заиления верхнего бьефа разделяется на несколько этапов. На первом этапе в нижний бьеф транспортируется самая мелкая фракция. Продолжительность этого этапа определяется как время, необходимое для заиления разности полного объема водохранилища и объема русла с уклоном для транспортирования самой мелкой фракции в нижний бьеф. Продолжительность второго и последующих этапов определяют таким же образом из условия транспортирования в нижний бьеф более крупных фракций. В конце заиления в верхнем бьефе образуется русло, по которому транспортируются все наносы. Кривую подпора С. Т. Алтунин предлагал принимать по уравнению квадратной параболы.

Приведенная методика имеет существенные недостатки, в основном несоответствие действительному процессу заиления водохранилищ. В крупных водохранилищах со значительной продолжительностью заиления (6—8 лет и более) в первые годы эксплуатации практически аккумулируется весь твердый сток реки. Продолжительность полного осветления потока зависит от соотношения между объемом водохранилища и стоком реки и может составлять большую часть общего срока заиления водохранилища. Вторым существенным недостатком методики расчета Г. И. Шамова и С. Т. Алтунина является отсутствие достаточных рекомендаций для определения распределения отложений наносов по длине подпертого бьефа и связанного с ним выклинивания подпора.

Между тем в практике проектирования плотинных гидроузлов на реках с большим количеством наносов определение выклинивания подпора в связи с заилением водохранилища и повышением уровней в реке выше него имеет очень важное значение. На основании этих расчетов определяется протяженность и высота дамб обвалования, уточняется срок заиления

водохранилищ, так как значительная часть твердого стока аккумулируется в зоне подпора.

Указанные недостатки в основном устраняются при применении рекомендуемого в настоящей работе метода расчета заиления водохранилищ и выклинивания подпора.

При разработке этого метода были учтены следующие результаты исследований заиления 1-го Тедженского водохранилища.

1. В начале чаши водохранилища, где поток резко расширяется, происходит интенсивное осаждение взвешенных наносов, так как транспортирующая способность потока здесь очень мала. Следствием этого является образование бара из отложившихся наносов, в котором позднее образуется русло с потоком, транспортирующим все взвешенные наносы в нижележащую часть водохранилища. Значительные объемы наносов отлагаются также в зоне выклинивания кривой подпора. По мере заиления верхних участков чаши водохранилища и создания в нем русла увеличивается проносимая мутность на нижележащие участки и их заиление.

2. Исследования автора, а также наблюдения гидрометслужбы показывают, что почти все взвешенные наносы р. Теджен оседают в чаше водохранилища и на подходах к нему. За период исследований 1960—1962 гг. в чаше водохранилища и на подходах к нему осело в среднем 99,7% стока взвешенных наносов (створ Аул-Ата, в конце зоны подпора). Аналогичное явление наблюдалось и при пропуске расходов через водохранилище, при малом его наполнении, в 1959 и 1961 гг.

3. Как показали съемки поперечных сечений чаши 1-го Тедженского водохранилища, проведенные в 1954, 1958 и 1960 гг., заиление происходит по всей его ширине.

Это является следствием растекания потока, образования протоков и действия вихрей по бокам основного потока на входном участке. Так как учет всех этих факторов очень сложен, то для практических расчетов по динамике осаждения наносов рекомендуется вводить все поперечное сечение водохранилища.

Заиление водохранилищ низконапорных гидроузлов в условиях р. Аму-Дарьи отличается от заиления 1-го Тедженского водохранилища тем, что вследствие малого подпора, относительно небольшой емкости (по сравнению со стоком реки) и больших расходов реки поток в верхнем бьефе будет иметь довольно ощутимые скорости и в начальный период заиления. Например, в верхнем бьефе Кизыл-Аякского гидроузла при подпоре 4 *м* и увеличении живого сечения потока в 3 раза средние скорости у плотины 0,2—0,4 *м/сек*. В связи с этим заиление верхнего бьефа в условиях низконапорных узлов на р. Аму-Дарье проходит более равномерно, чем в 1-м Тедженском водохранилище. На выходе из водохранилища при пропуске паводка

поток имеет некоторую критическую мутность. Применение методики расчета русловых водохранилищ, рекомендуемой ниже, дает результаты, соответствующие ходу заиления как в условиях Тедженского водохранилища, так и в условиях верхних бьефов Аму-Дарьинских гидроузлов.

Разработанный метод расчета рекомендуется для водохранилищ на реках с большим количеством взвешенных наносов

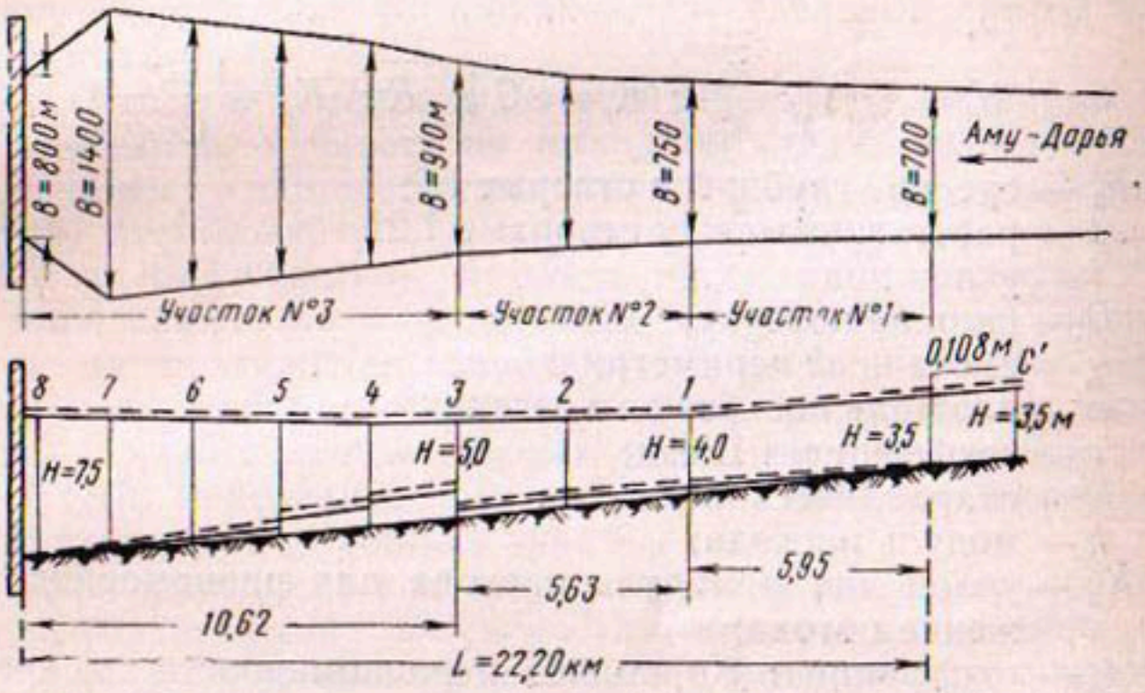


Рис. 40. Схематический план (*а*) и продольный профиль (*б*) руслового водохранилища с расчетными створами.

(примерно 90% всего твердого стока) и относительно небольшим количеством донных и придонных наносов. К таким рекам относятся Аму-Дарья, Вахш, Мургаб, Теджен, Терек, Аракс и др.

На основании изучения значительного количества топографических материалов установлено, что по конфигурации в плане (рис. 40) почти все русловые водохранилища могут быть разделены на три основных участка:

1) зона в пределах первоначального выклинивания подпора (концевой участок кривой подпора), характеризующаяся относительно незначительным изменением ширины потока по длине;

2) переходная зона от концевого участка к самой чаше водохранилища, характеризующаяся резким изменением ширины потока по длине;

3) зона самой чаши водохранилища со значительной шириной потока и очень малыми уклонами свободной поверхности потока.

Построение первоначальной кривой подпора водохранилища рекомендуется производить по упрощенному способу Р. Р. Чугаева [26].

Уравнение кривой подпора:

$$\frac{i_0 l}{h_0'} = \eta_2' - \eta_1' - (1 - j)\left[F(\eta_2') - F(\eta_1')\right], \qquad (233)$$

где

$$\eta_1' = \frac{h_1}{h_0'} \text{ и } \eta_2' = \frac{h_2}{h_0'};\ j = \frac{\alpha i c_{ср}^2}{g} \cdot \frac{B_{ср}}{\chi_{ср}};$$

$$h_0' = h_{ср} \sqrt{\frac{K_0}{K_{ср}}};\ K = \omega C \sqrt{R};\ K_0 = \frac{Q}{\sqrt{i_0}};$$

h_1, h_2 — средние глубины в створах 1,2;
l — расстояние между створами 1,2;
i — уклон дна;
B — ширина поверху;
χ — смоченный периметр;
ω — площадь поперечного сечения;
c — коэффициент Шези;
R — гидравлический радиус;
k — модуль расхода;
i_0, K_0 — уклон дна и модуль расхода для равномерного движения потока;
$\alpha = 1{,}1$ — коэффициент Кориолиса неравномерности распределения продольных скоростей.

Значение функции F определяется по таблице Б. А. Бахметева для всех русел при гидравлическом показателе $x = 4$. (Н. Н. Павловский. Гидравлический справочник. 1937, стр. 326).

Осаждение взвешенных наносов по длине водохранилища рассчитывают как в последовательно расположенных отстойниках, соответствующих рассмотренным выше участкам верхнего бьефа. 1-й и 2-й отстойники (по течению) могут быть условно названы головными, а 3-й внутрисистемным.

Динамику осаждения наносов определяют по методу ВНИИГиМ [23]. При подсчете средних скоростей течения в соответствии с изложенным выше учитывают полные поперечные сечения чаши водохранилища. При назначении длин 1-го и 2-го головных отстойников следует соблюдать условия:

$$w_{x_{г_1}} \geqslant w_{H_{г_1}};\ w_{x_{г_2}} \geqslant w_{H_{г_2}};\ w_{H_{г_1}} = \frac{q_1}{L_1};\ w_{H_{г_2}} = \frac{q_2}{L_2},$$

$W_{x_{г_1}}$ и $W_{x_{г_2}}$ — наименьшие гидравлические крупности избыточной мутности головного отстойника,

$w_{H_{г_1}} = \frac{q_1}{L_1}$;

q_1 и q_2 — удельные расходы;
L_1 и L_2 — длины отстойников.

При расчете 2-го головного и внутрисистемного отстойников мутность на входе и предельная гидравлическая крупность принимается такой же, как и для 1-го головного отстойника, т. е. равной соответствующим данным для бытовых условий в реке. Применение такого метода расчета вполне допустимо при соблюдении условия $L_в \geqslant \frac{q_в}{w_{x_{г_2}}}$, где $L_в$ — длины 2-го головного или внутрисистемного отстойников; q — удельный расход в этих отстойниках.

Для 1-го и 2-го головных отстойников, длина которых чаще всего невелика, мутность на выходном створе определяют по осредненным гидравлическим элементам. Внутрисистемный (третий) отстойник, обычно имеющий значительную длину, разбивают на ряд участков, мутность на выходных створах участков определяют по осредненным гидравлическим элементам потока на протяжении вышележащей части этого отстойника. Объемы отложений на участках находят по мутности в вышележащем и нижележащем створах, расходам и расчетным периодам. Чтобы определить среднюю высоту слоя заиления, объем заиления делят на площадь участка в плане.

После проведения расчета за один период вычерчивают новую линию дна, затем по скоростям, начиная от плотины, определяют средние уклоны на участках и вычерчивают новую кривую свободной поверхности. Выклинивание подпора за каждый период определяют как длину участка кривой подпора, необходимую для сопряжения глубины в конце расчетного периода начального створа первого отстойника h_2 и бытовой глубины реки h_1 по уравнению (233). Длина головного отстойника № 1 увеличивается на величину выклинивания подпора за рассматриваемый период. После этого рассчитывают заиление водохранилища для нового периода.

Завершение заиления водохранилища (руслового) соответствует тому периоду, когда обеспечен транспорт всех взвешенных и донных наносов в нижний бьеф, т. е. выполняется равенство, например, для условий р. Аму-Дарьи:

$$\rho_{кр} + \rho_д = (1{,}1 \div 1{,}11)\,\rho_0, \qquad (234)$$

где $\rho_{кр}$ и $\rho_д$ — критические мутности взвешенных и донных наносов для потока в формирующемся в заиленной части водохранилища русле,

ρ_0 — мутность реки в бытовых условиях.

Как показали конкретные расчеты по Кизыл-Аякскому гидроузлу с применением уравнения (234), после заиления верхнего бьефа русло формируется с уклоном меньше бытового и с большей шириной поверху, что обеспечивает транспорт всех взвешенных и донных наносов реки в нижний бьеф.

При этом предполагается, что часть взвешенных наносов, транспортируемых рекой в бытовых условиях, перейдет в донные, так как в бытовых условиях поток не насыщен донными наносами. Неполное насыщение потока в бытовых условиях донными наносами является следствием того, что максимальный диаметр наносов, которые поток может передвигать по дну в условиях р. Аму-Дарьи (створ Кизыл-Ляк), равен 14 *мм* (128б), в то время как в составе донных отложений частицы с $d>0{,}25$ *мм* почти отсутствуют. Донные отложения р. Аму-Дарьи в этом районе состоят в основном из фракций $d=0{,}05$—$0{,}25$ *мм*; поток насыщен ими во взвешенном состоянии, и поэтому они не могут дополнительно взвешиваться. Способность потока вымывать и перемещать в виде донных наносов частицы с $d=0{,}05$—$0{,}25$ *мм*, лежащие сплошным слоем на дне реки, также ограничена, так как сплошной слой мелких наносов труднее перемещать, чем отдельные крупные частицы. Поэтому транспортирующая способность потока в отношении донных наносов с частицами 0,05—0,25 *мм* в бытовых условиях полностью не используется.

После формирования в верхнем бьефе русла с меньшим уклоном, чем бытовой, часть взвешенных наносов, равная разности бытовой мутности реки и критической для сформировавшегося русла, перейдет в донные наносы, увеличив степень насыщенности потока последними.

Величину $\rho_д$ — количество донных наносов, приходящихся на 1 $м^3$ расхода, которое поток может транспортировать, определяют по формуле А. Г. Хачатряна (135):

$$\rho_д = 0{,}73\, u_д \left[\ln \frac{u_л}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_л}\right) w_{\min д}\right],$$

где $u_д = f(d_{\max})$.

Значение наибольшего диаметра донных наносов, которые могут перемещаться потоком $d_{\max}$, определяют подбором по равенству (128б), предложенному В. Н. Гончаровым [11] и преобразованному А. Г. Хачатряном:

$$d_{\max}\left(\lg \frac{8{,}8\,H}{d_{\max}}\right)^2 = 0{,}053\, v^2.$$

Величину $w_{\min д}$ определяют по рекомендациям, приведенным в главе II данной книги.

Критическая мутность (взвешенных наносов) вычисляется по формуле (14).

Уклон и размеры формируемого потоком русла в заиленном верхнем бьефе определяют подбором по уравнению (234), пользуясь формулами (227а), (229в), (232), (135), 128б).

Отметка дна $\Delta_ф$ русла, формируемого потоком в верхнем бьефе (рис. 41) в створе на расстоянии l_x от плотины, определяется по формуле:

$$\Delta_ф = \Delta_б + H_п - (i_0 - i)\, l_x - H_{ср}, \qquad (235)$$

где $\Delta_б$ — бытовая отметка дна в створе;
i_0 — бытовой уклон дна реки;
i — уклон дна сформировавшегося в заиленном верхнем бьефе русла;
$H_{ср}$ — средняя глубина сформировавшегося русла;
$H_п$ — глубина подпертого бьефа у плотины.

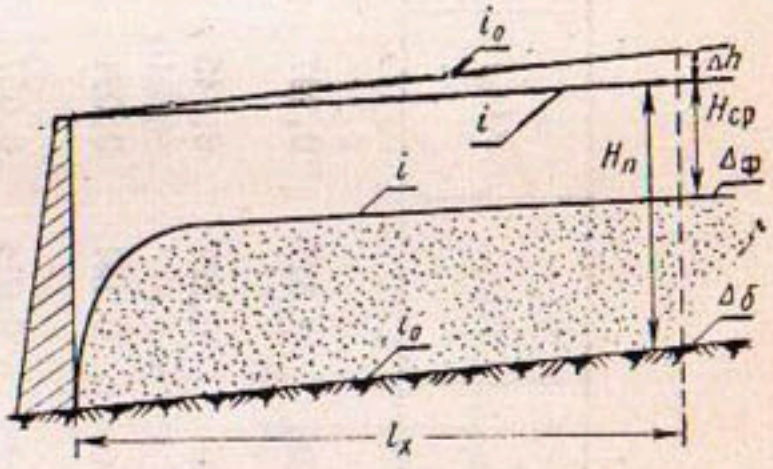


Рис. 41. Схематический продольный разрез заиленного водохранилища.

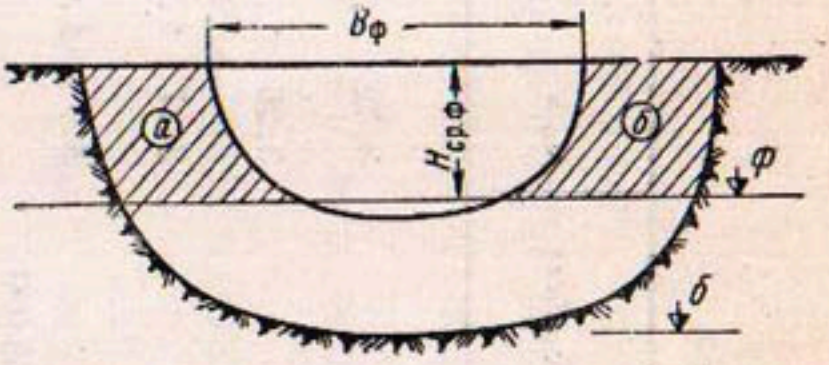


Рис. 42. Схематическое поперечное сечение заиленного верхнего бьефа:

$\Delta_б$, $\Delta_ф$ — отметки бытового и среднего дна формируемого потоком русла; *а* и *б* — поперечные сечения боковых «пазух», которые заиляются после повышения дна до $\Delta_ф$.

После достижения на каком-либо участке отметок дна, соответствующих отметкам формируемого в верхнем бьефе русла, объем заиления распределяется по боковым участкам *a*, *b* (рис. 42). Объем этих участков равен разности полного объема водохранилища на этом участке с дном на отметке формируемого русла и объема русла. Время, необходимое для заиления этого объема, определяют делением на среднюю интенсивность осаждения наносов, которую находят по средним величинам скорости и уклона за расчетный период:

$$v_{ср.р} = \frac{Q_р}{\omega_ф + 0{,}5\,(\omega_а + \omega_б)}, \qquad (236)$$

где $\omega_р$ — площадь поперечного сечения формируемого русла;
$\omega_а$, $\omega_б$ — площадь поперечных сечений боковых участков.

Ниже приведен пример расчета заиления верхнего бьефа Кизыл-Аякского гидроузла для двух декад с расходом и поперечным сечением русла, близкими к среднепаводковым.

Исходные данные примера: расход $Q = 4000$ *м³/сек*, бытовая ширина русла реки $B = 700$ *м* при средней глубине $H_{ср} = 3{,}5$ *м*,

ТАБЛИЦА 33

Определение длины первоначальной кривой подпора

Створ	h, м	Участок	$h_{ср}$, м	$K_{ср}$, м³/сек	K_0, м³/сек	H_0, м	η'_1	η'_2	$F(\eta'_1)$	$F(\eta'_2)$	i	l, м
0	3,5	1	3,75	328 000		3,32	1,055	1,205	0,527	0,247	0,095	5950
1	4,0	2	4,25	436 000		3,26	1,23	1,38	0,227	0,145	0,099	3050
2	4,5	3	4,75	579 000		3,17	1,42	1,58	0,131	0,091	0,102	2580
3	5,0	4	5,25	792 000		3,0	1,67	1,89	0,076	0,057	0,116	2220
4	5,5	5	5,75	1 060 000	258 000	2,84	1,94	2,11	0,048	0,036	0,12	2140
5	6,0	6	6,25	1 330 000		2,75	2,18	2,36	0,034	0,026	0,12	2130
6	6,5	7	6,75	1 600 000		2,70	2,41	2,59	0,024	0,019	0,13	2070
7	7,0	8	7,25	1 495 000		3,01	2,33	2,49	0,027	0,021	1,13	2060
8	7,5											

22 200

ТАБЛИЦА 34

Гидравлические элементы потока и распределение заиления верхнего бьефа в 1-ю декаду

Створ	Участок	Расчетный отстойник	Расчетный уклон $i \cdot 10^{-3}$	$H_{ср}$, м расч.	$v_{ср}$, м/сек	$w_н$, мм/сек	$w_х$, мм/сек	$u_в$, мм/сек	$\rho_в$, кг/м³	Интенсивность осаждения $(\rho_i - \rho_{i+1})$ кг/м³	Объем заиления, тыс. м³
0	Бытовое русло		0,24	3,5	1,63	—	—	—	4,42		
	1	№ 1								0,128	326
1			0,156	3,75	1,47	0,926	7,62	10,3	4,292		
	2	№ 2								0,556	1420
2			0,0623	4,48	1,095	0,863	1,86	6,05	3,736		
3	3									1,020	2610
	4										
4			0,015	5,25	0,758	1,79	0,058*	2,86	2,716	0,610	1560
	5	№ 3									
5			0,0083	5,50	0,68	0,86	0,058	2,19	2,106		
	6		0,00752	5,74	0,626	0,554	0,058	1,96	1,776	0,330	846
6											
	7		0,00716	5,98	0,581	0,406	0,058	1,75	1,512	0,264	675
7											
	8		0,00694	6,23	0,546	0,320	0,058	1,655	1,341	0,171	438
8											

* $w_x = w_1 = 0{,}058$ мм/сек

подпор у плотины $\Delta H_п = 4$ *м*. Очертание водохранилища представлено на рисунке 40.

Результаты расчета первоначальной кривой выклинивания подпора приведены в таблице 33, где общая длина первоначальной кривой подпора составляет $L = 22\,200$ *м*.

По рекомендуемой С. Т. Алтуниным приближенной зависимости для определения общей длины подпора:

$$L = 1{,}3\,\frac{\Delta H_п}{i} = 1{,}3\,\frac{4}{0{,}00024} = 21\,700 \text{ м}.$$

Результаты расчета динамики осаждения взвешенных наносов по длине верхнего бьефа за первую декаду приведены в таблице 34 при среднепаводковой мутности за период май — август $\rho_0 = 4{,}42$ *кг/м*³; $w_{n+1} = 17{,}8$ *мм/сек*, $w_1 = 0{,}058$ *мм/сек*, $C_0 = 0{,}936$ *кг/м*³.

Для определения объемов заиления объемный вес осевших в водохранилище наносов принимают $\gamma_н = 1{,}35$ *т/м*.

Средняя высота слоев заиления, уклоны свободной поверхности верхнего бьефа, величины повышения уровней в створах, глубина и расчетные скорости, взвешивающие скорости и мутность потока, объемы заиления за вторую декаду приведены в таблице 35. Кривые свободной поверхности и распределение заиления за указанное время приведены на рисунке 40.

Как видно из таблицы 35, уровень в начальном створе (0) после первой декады повысился на 0,18 *м*. Глубина в этом створе к началу второй декады равна $H_0' = 3{,}5 + 0{,}180 = 3{,}68$ *м*. Для сопряжения этой глубины с бытовой $H_0 = 3{,}5$ *м* кривая подпора удлинится на расстояние, определяемое расчетом ($h_1 = 3{,}5$ *м*; $h_2 = 3{,}68$ *м*; $h_{ср} = 3{,}59$ *м*; $\omega_{ср} = 2510$ *м*²; $C = 67{,}7$ *м/сек*; $i = 0{,}101$; $k_{ср} = 293\,000$ *м*³/*сек*).

$$h_0' = h_{ср}\sqrt{\frac{K_0}{K_{ср}}}\,,\quad K_{ср} = \frac{Q}{\sqrt{i}} = 258\,000 \text{ м}^3/\text{сек};$$

$$h_0' = h_{ср}\sqrt{\frac{K_0}{K_{ср}}} = 3{,}59\sqrt{\frac{258\,000}{293\,000}} = 3{,}37 \text{ м};$$

$$\eta_1' = \frac{h_1}{h_0} = \frac{3{,}5}{3{,}37} = 1{,}04;\quad \eta_2' = \frac{3{,}68}{3{,}37} = 1{,}09;$$

$$F(\eta_1') = 0{,}600;\quad F(\eta_2') = 0{,}415.$$

После подстановки полученных величин h_0', η_2', η_1', j, $F(\eta_2')$ и $F(\eta_1')$ в уравнение (233) получим удлинение кривой подпора, а следовательно, и удлинение головного отстойника № 1 на $l_{0-01} = 2{,}4$ *км*.

Уклон русла, которое сформируется в верхнем бьефе, определяют подбором из условия соблюдения равенства (234).

ТАБЛИЦА 35

Гидравлические элементы потока и распределение заиления во 2-ю декаду

Створ	Участок	Средний слой заиления, $h_{зф}$	$i_2 \cdot 10^{-3}$	$i_1 \cdot 10^{-3}$	$\Delta h = (i_2 - i_1)l$	$s\Delta h$	Средняя глубина в створе после 1-й декады $H = H - h_3 + \Sigma h$	Средняя глубина на участке	Расчетная скорость $V_{ср}$	Расчетный уклон $i_{ср} \cdot 10^{-3}$	$u_в$, *мм/сек*	w_x, *мм/сек*	$w_н$, *мм/сек*	$\rho_в$
0						0,180	3,63							
	1	0,076	0,156	0,156	0	0,180	3,528 / 3,872	3,604	1,53	0,156	10,73	8,24	0,661	4,295
1														
	2													
2		0,308	0,0705	0,0623	0,046			5,296	1,12	0,0705	6,48	2,44	0,871	3,838
	3													
3						0,124	4,726 / 3,964							
	4	1,17	0,053	0,015	0,084			4,172	0,956	0,053	5,02	0,461	1,8	3,434
4						0,0504	4,38 / 4,804							
	5	0,746	0,0222	0,006	0,034			5,037	0,85	0,0406	4,14	0,058	0,86	2,961
5						0,0164	5,27 / 5,698							
	6	0,318	0,011	0,006	0,0107			5,943	0,795	0,0309	3,60	0,058	0,554	2,576
6						0,00574	6,188 / 6,265							
	7	0,241	0,0688	0,006	0,00182			6,514	0,706	0,0250	3,02	0,058	0,416	2,192
7						0,00392	6,763 / 6,811							
	8	0,193	0,0079	0,006	0,00392			7,059	0,667	0,0218	2,74	0,058	0,32	1,951
8							7,500 / 7,307							

Приведенный ниже расчет показывает, что для условий Кизыл-Аякского гидроузла при уклоне сформировавшегося в верхнем бьефе русла $i=0{,}00015$ соблюдается равенство (234).

За период май — август при среднепаводковом расходе $Q_{ср.п}=3947$ *м³/сек.*

$$B = 0{,}16\sqrt{\frac{Q}{i}} = 0{,}16\sqrt{\frac{3947}{0{,}00015}} = 320 \text{ м};$$

$$q = \frac{3947}{840} = 4{,}81 \text{ м}^3/\text{сек};$$

$$H = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}}\right)^{3/5} = \frac{0{,}02 \cdot 4{,}81}{0{,}00015} = 3{,}44 \text{ м};$$

$$v = \frac{4{,}81}{3{,}44} = 1{,}39 \text{ м/сек};$$

$$u_{пр} = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\,i^{1/4} = 0{,}065\,(1{,}39 - 0{,}05)\cdot 0{,}00015^{1/4} =$$

$$= 0{,}00965 \text{ м/сек} = 9{,}65 \text{ мм/сек};$$

$$c_т = 200u_в = 200 \cdot 0{,}00965 = 1{,}93 \text{ кг/м}^3;$$

$$c_0 = \frac{\rho_{о.ср.пов}}{\ln\frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1}-w_1}{w_{n+1}}} = \frac{4{,}42}{\ln\frac{17{,}8}{0{,}058} - \frac{17{,}8-0{,}058}{17{,}8}} = 0{,}936 \text{ кг/м}^3;$$

$$w_x = \frac{c_т - c_0}{\frac{c_т}{u_в} - \frac{c_0}{w_{n+1}}} = \frac{1{,}93 - 0{,}936}{200 - \frac{0{,}936}{0{,}0178}} = 0{,}00676 \text{ м/сек} = 6{,}76 \text{ мм/сек};$$

$$\rho_{кр} = c_0\left(\ln\frac{w_x}{w_1} - \frac{w_x - w_1}{w_{n+1}}\right) + c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в}\right) = 4{,}21 \text{ кг/м}^3;$$

$$d_{max}\left(\ln\frac{8{,}8 \cdot 3{,}44}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}058 \cdot 1{,}39; \quad d_{max} = 0{,}008 \text{ м} = 8 \text{ мм}$$

при $d_{max} = 8$ *мм*, $u_д = 330$ *мм/сек.*

Принимая $w_{min\,д} = w_x = 6{,}76$ *мм/сек*, получим по формуле (135) $\rho_д = 0{,}83$ *кг/м³*. Общее количество наносов, которое транспортируется потоком при $i=0{,}00015$, составляет $\rho_р = \rho_{кр} + \rho_д = 4{,}21 + 0{,}83 = 5{,}04$ *кг/м³*.

На основании наших исследований в голове Каракумского канала, проведенных в 1957 г. [14], количество донных наносов для р. Аму-Дарьи в районе Кизыл-Аякского створа равно 11% от количества взвешенных наносов, общее количество наносов, которое транспортируется потоком в бытовых условиях:

$$\rho_{р.б} = 1{,}11\rho_0 = 1{,}11 \cdot 4{,}42 = 4{,}91 \text{ кг/м}^3 \approx \rho_р.$$

Таким образом, при уклоне русла, сформировавшегося в заиленном верхнем бьефе ($i=0{,}00015$), все переносимые речным

потоком взвешенные и донные наносы транспортируются в нижний бьеф. В данном случае наиболее обосновано принять $W_{min\,д}=W_x$, так как часть взвешенных наносов при формировании русла в заиленном верхнем бьефе переходит в донные. Если принять $w_{min\,д}=2{,}27$ *мм/сек* — гидравлической крупности частиц с $d=0{,}05$ *мм*, которые являются минимальными для донных наносов р. Аму-Дарьи, по формуле (135) получим $\rho_д=0{,}965$ *кг/м*³ против $\rho_д=0{,}83$ *кг/м*³ при $w_{min\,д}=w_x=6{,}71$ *м/сек*.

Продолжительность расчетного периода назначается в зависимости от соотношения емкости водохранилища и объема годового стока наносов в реке. Для низконапорных гидроузлов на р. Аму-Дарье с емкостью верхнего бьефа менее 0,5—1,0 млрд. *м*³ расчет заиления в паводок рекомендуется проводить по декадам (период апрель — сентябрь) в период межени (октябрь — март) — по месяцам. Для Аму-Дарьинских водохранилищ с емкостью верхнего бьефа более 1 млрд. *м*³ продолжительность расчетного периода можно принять равной 1 месяцу. Такая же продолжительность расчетных периодов рекомендована при расчете заиления водохранилищ с отношением их объема к объему годового стока наносов более чем 5 : 1. В случае кратковременности паводка, например для р. Теджен, продолжительность расчетных периодов может быть сокращена.

Рекомендации по учету донных наносов при расчете заиления русловых водохранилищ сделаны исходя из следующих соображений.

Исследования на Аму-Дарье и других реках показывают, что сток донных наносов составляет примерно 10—11% от стока взвешенных наносов. При этом к донным наносам относятся не только наносы, перемещающиеся по дну, но и наносы, переходящие периодически во взвешенное состояние, и взвешенные наносы, перемещающиеся в придонном слое потока толщиной 10—15 *см*, не улавливаемые приборами при отборе проб на мутность. Сокращение транспортирующей способности потока в отношении взвешенных наносов и выпадение части их из потока повлечет соответствующее сокращение транспортирующей способности потока в отношении донных наносов и отложение части из них на дно. Следует учесть, что при осаждении часть взвешенных наносов будет переходить в донные, и поток будет транспортировать донные наносы на той же длине верхнего бьефа, что и взвешенные. Точный учет количества донных наносов связан с большими трудностями.

Для рек с большим количеством взвешенных наносов соотношение между количеством взвешенных и донных наносов можно принять постоянным.

В связи с изложенным при расчете заиления русловых водохранилищ на реках, транспортирующих в основном взвешенные наносы (90% всего твердого стока), рекомендуется увеличивать

объем отложившихся наносов на 10%. Отсюда объем отложившихся наносов на участке i — $V_{зi}$ определяется по формуле:

$$V_{зi} = 1{,}1\,(\rho_{i-1} - \rho_i)\,\frac{86{,}4Qt}{\gamma_н}\ м^3, \qquad (237)$$

где ρ_{i-1} — средняя мутность потока на входном створе участка i, $кг/м^3$;

ρ_i — средняя мутность потока на выходном створе участка i, $кг/м^3$;

Q — расход реки, $м^3/сек$;

t — продолжительность расчетного периода в сутках;

$\gamma_н$ — объемный вес наносов, $т/м^3$.

Для облегчения подбора уклона и размеров русла, формируемого потоком в верхнем бьефе при заилении можно составить графики $B=f(i)$ при разных Q, $H=f(Q)$ при разных n, $\rho_{кр}=f(i)$ для различных значений Q и ρ_0.

§ 24. Учет изменения руслового режима реки при возведении гидроузлов на притоках

Сооружение водохранилищных гидроузлов на притоках рек, транспортирующих большое количество наносов, влечет за собой изменение руслового режима самой реки и притока ниже узла. Аккумуляция твердого стока в водохранилище создает условия для размыва русла притока ниже узла и в реке.

Интенсивность и продолжительность размыва русла реки зависит от доли твердого стока притока в общем твердом стоке реки, состава донных отложений, изменения жидкого стока в связи с регулированием части его в водохранилище, построенном на притоке, емкости этого водохранилища.

Изменение руслового режима реки при сооружении водохранилищных гидроузлов на притоках показано на примере строительства Нурекской ГЭС (р. Вахш).

Створ Нурекской ГЭС расположен на р. Вахш в 259 *км* выше устья. Водохранилище Нурекского гидроузла рассчитано на емкость 10,5 млрд. $м^3$, из которых примерно 6 млрд. $м^3$ составляет мертвый объем, а 4,5 млрд. $м^3$ полезный объем. Створ Головной ГЭС на р. Вахш, которая введена в эксплуатацию в 1963 г., расположен на 86 *км* ниже створа Нурекской ГЭС.

После постройки Нурекского гидроузла твердый сток р. Вахш, составляющий с учетом донных наносов примерно 95 млн. *т* в год, будет в течение 70 лет полностью аккумулирован в водохранилище; после чего наносы начнут поступать в нижний бьеф.

Нурекское водохранилище осуществит также некоторое регулирование жидкого стока р. Вахш.

На основании данных Среднеазиатского отделения проектного института Гидропроект о попусках из Нурекского водохранилища, а также данных о среднемноголетних расходах взвешенных наносов и мутности р. Аму-Дарьи в створах Керки и Чатлы нами определена средняя мутность р. Аму-Дарьи в створах Керки и Чатлы после постройки Нурекской ГЭС (табл. 36).

ТАБЛИЦА 36

Изменение расходов и мутности р. Аму-Дарьи после строительства Нурекской ГЭС на р. Вахш

Месяцы	Расход в створе Керки		Мутность до строительства ГЭС		Мутность после строительства	
	до строительства ГЭС	после строительства	Керки	Чатлы	Керки	Чатлы
I	821	1098	1,15	0,804	0,82	0,573
II	815	1091	1,28	0,824	0,830	0,535
III	1060	1300	2,08	1,331	1,380	0,885
IV	2120	2101	4,84	2,568	3,760	2,000
V	2770	2423	5,58	3,838	4,27	2,940
VI	4080	3689	4,88	3,677	4,15	3,120
VII	4970	4350	3,98	3,414	2,38	2,040
VIII	3970	3582	3,67	2,979	1,92	1,555
IX	2280	2589	2,31	2,013	1,45	1,260
X	1175	1525	1,28	1,42	0,811	0,900
XI	1011	1184	1,11	1,21	0,82	0,893
XII	926	1066	1,18	0,931	0,89	0,702

При этом сток взвешенных наносов р. Вахш полностью исключался из твердого стока Аму-Дарьи. Размыв русла р. Вахш ниже створа Нурекской ГЭС и русла р. Аму-Дарьи ниже слияния рек Пяндж и Вахш не учитывался. Данные таблицы 36 являются исходными для решения этого вопроса, что рассмотрено ниже.

По нашим подсчетам, выполненным в 1959 г. с использованием данных для р. Вахш за 15 лет и для р. Аму-Дарьи за 21 год, среднемноголетние годовые стоки взвешенных наносов составляют для р. Вахш 84524,5 тыс. *т*, для р. Аму-Дарьи в створе Керки 245 737,5 тыс. *т*, следовательно, сток взвешенных наносов р. Вахш равен 34,5% от стока взвешенных наносов р. Аму-Дарьи в створе Керки.

Таким образом, средневзвешенная по стоку мутность р. Аму-Дарьи в створе Керки после постройки Нурекской ГЭС в период май — август равна 3,05 *кг/м*^{3}, что по отношению к соответствующей величине до постройки Нурекского водохранилища

составляет $\frac{3,05}{4,42} \cdot 100 = 69\%$. Средний расход р. Аму-Дарьи в период май — август будет равен 3513 *м³/сек* вместо 3947 *м³/сек* до постройки ГЭС.

Фракционный состав и предельную гидравлическую крупность взвешенных наносов р. Аму-Дарьи после сооружения Нурекской ГЭС определяли с учетом аккумуляции твердого стока р. Вахш в водохранилище этой ГЭС. В качестве исходных данных были приняты наши исследования фракционного состава взвешенных наносов р. Аму-Дарьи в голове Каракумского канала (створ Бассага 1955—1958 гг.) и данные гидрометслужбы на р. Вахш в створах Туткаул (выше створа Нурекской ГЭС) и головном сооружении Вахшского магистрального канала (ниже створа ГЭС) на паводковый период (май — август) 1955 — 1957 гг. В данные гидрометслужбы по фракционному составу взвешенных наносов р. Вахш, полученные на основе анализа методом пипетки с подготовкой проб (кипячением), введен коэффициент $k=0,5$ для фракции $d<0,01$ *мм*, который определен при наших исследованиях в голове Каракумского канала в 1955—1958 гг. (см. § 16).

Сток взвешенных наносов р. Вахш за паводковый период (май — август), по среднемноголетним данным, составляет 38,5% от стока взвешенных наносов р. Аму-Дарьи за тот же период. Определение содержания фракций в составе взвешенных наносов р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки после постройки Нурекской ГЭС приведено ниже.

1. Фракция $d>0,05$ *мм* в составе взвешенных наносов р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки составляет 24,91%, а в составе взвешенных наносов р. Вахш — 30,8% (табл. 37). Следовательно, наносы этой фракции из р. Вахш дают $30,8 \cdot 0,385 = 11,85\%$ общей мутности р. Аму-Дарьи, а наносы р. Пяндж — остальную часть (24,91—11,85=13,06%). После

ТАБЛИЦА 37

Фракционные составы взвешенных наносов р. Аму-Дарьи до и после постройки Нурекской ГЭС на р. Вахш

Участок	Период исследований, число анализов	Содержание фракций, %, при *d*, *мм*		
		<0,01	0,01—0,05	>0,05
Бассага—Керки	1955—1958 гг. (100 анализов)	9,41	65,68	24,91
Створ головного сооружения Вахшского магистрального канала	1955—1957 гг. (16 анализов)	17,6	51,6	30,8
Бассага—Керки после постройки ГЭС	По расчету	4.3	74,4	21,3

постройки Нурекского гидроузла, когда в р. Аму-Дарье будут только взвешенные наносы р. Пяндж, содержание этой фракции составит 13,06 : 0,615 = 21,3 (табл. 37).

2. Для фракции $d = 0{,}05—0{,}01$ *мм* доля наносов р. Пяндж до постройки Нурекского гидроузла равнялась $65{,}68—51{,}6 \cdot 0{,}385 = 45{,}78\%$, теперь содержание этой фракции в составе взвешенных наносов р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки $45{,}78 : 0{,}615 = 74{,}4\%$.

3. Для фракции $d < 0{,}01$ *мм* тех же наносов на том же участке до постройки гидроузла: $9{,}41—17{,}6 \cdot 0{,}385 = 2{,}65\%$, после — $2{,}65 : 0{,}615 = 4{,}3\%$ (табл. 37).

На основании данных таблицы 37 определены предельные гидравлические крупности взвешенных наносов по уравнениям (26), (27). Наибольшая гидравлическая крупность взвешенных наносов р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки после сооружения Нурекской ГЭС равна $w_{n+1} = 12{,}5$ *мм/сек*, наименьшая гидравлическая крупность на этом участке после сооружения ГЭС $w_1 = 0{,}075$ *мм/сек*.

Изменение предельной гидравлической крупности взвешенных наносов р. Аму-Дарьи в среднем течении (Чарджоу — Ильчик) и в низовьях (Таш-Сака — Ильчик) после постройки Нурекской ГЭС принимаем пропорциональным изменению этой величины на участке Бассага — Керки (табл. 38).

ТАБЛИЦА 38

Предельные гидравлические крупности взвешенных наносов р. Аму-Дарьи до и после постройки Нурекской ГЭС

Участок реки	До постройки Нурекской ГЭС		После постройки Нурекской ГЭС	
	w_{n+1}	w_1	w_{n+1}	w_1
Бассага—Керки . .	17,8	0,058	12,5	0,075
Чарджоу—Ильчик .	14,5	0,048	10,2	0,062
Таш-Сака—Чатлы .	11,8	0,02	8,3	0,026

На основании приведенных данных можно предположить, что после постройки Нурекской ГЭС при уменьшении мутности р. Аму-Дарьи и наибольшей гидравлической крупности начнется размыв русла, который будет продолжаться до тех пор, пока уклон и размеры поперечного сечения русла не придут в соответствие с новыми параметрами наносов.

Сведения о фракционном составе донных отложений р. Аму-Дарьи имеются в гидрологических ежегодниках за 1955 и 1956 гг. Осредненные составы донных отложений р. Аму-Дарьи в створе Керки приведены в таблице 39.

ТАБЛИЦА 39

Фракционный состав донных отложений р. Аму-Дарьи в створе Керки

Год	Содержание фракции d мм, %					Количество проб	w_{n+1}, мм/сек	w_1, мм/сек
	<0,05	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,5	0,5—1			
1955	7,1	9,8	26,8	55,0	1,3	239	—	—
1956	5,38	9,83	25,93	56,4	2,46	84	—	—
Среднее	6,24	9,82	26,36	55,7	1,88	323	60,1	1,93

Величина постоянной кривой распределения грунта равна:

$$c_{гр} = \frac{1}{\ln \frac{w_{(n+1)\,гр}}{w_{1гр}} - \frac{w_{(n+1)\,гр} - w_{1гр}}{w_{(n+1)\,гр}}} = 0{,}405 \ кг/м^3.$$

Русло р. Вахш на участке между Нурекской и головной ГЭС имеет слой аллювиальных отложений толщиной от 5 до 30 *м* с большим содержанием валунов. Данные о фракционном составе донных отложений на этом участке имеются лишь в гидрологических ежегодниках за 1941—1942 гг. по створам Туткаул и Головное сооружение Вахшского магистрального канала. Анализ фракционного состава этих отложений производился по методу Сабанина, который дает преувеличение содержания фракций $d<0{,}01$ *мм* в 4—4,5 раза по сравнению с анализом по методу ВНИИГиМ. Так, по данным наших исследований, в голове Каракумского канала среднее содержание фракции $d<0{,}01$ *мм* в составе взвешенных наносов 9,41%, а по данным Керкинской ГМС (1951 г. — метод Сабанина) — 43,7. В связи с этим при определении расчетного фракционного состава донных отложений р. Вахш ниже створа Нурекской ГЭС содержание фракции $d<0{,}01$ *мм*, приведенное в ежегодниках, сокращается в 4,5 раза, разность между величиной, приведенной в ежегоднике и принятой по расчету, прибавляют к содержанию фракции $d=0{,}01—0{,}05$ *мм*. Средний фракционный состав донных отложений р. Вахш, а также расчетный состав с учетом

ТАБЛИЦА 40

Состав донных отложений р. Вахш в створах Туткаул — Головное сооружение Вахшского магистрального канала за 1941—1942 гг.

Состав отложений	Содержание фракций, % при d, мм				Число проб	w_{n+1}, мм/сек	w_1, мм/сек
	<0,01	0,01—0,05	0,05—0,25	>0,25			
По данным ГМС . .	29,25	16,25	49,85	4,65	21	—	—
Расчетный	6,51	38,99	49,85	4,65	21	60,0	0,062

поправок к содержанию фракций $d<0{,}01$ *мм* приведен в таблице 40.

Постоянная кривой распределения состава донных отложений р. Вахш на участке Туткаул (Нурекская ГЭС) — Головное сооружение Вахшского магистрального канала (Головная ГЭС):

$$c_{гр}=\frac{1}{\ln\frac{w_{n+1}}{w_1}-\frac{w_{n+1}-w_1}{w_{n+1}}}=\frac{1}{\ln\frac{60}{0{,}062}-\frac{60-0{,}062}{60}}=0{,}17\ кг/м^3.$$

По данным исследований Среднеазиатского отделения Гидропроекта (САОГидропроекта), проведенных в 1960—1961 гг. на участке р. Вахш от створа головной ГЭС до устья, протяженность примыкающего к устью реки участка с песчаным руслом равна 50—60 *км*. На протяжении 110—120 *км* от створа Головной ГЭС русло р. Вахш представлено валунно-галечными отложениями, переходящими на последних 10—20 *км* в гравий.

Фракционный состав донных отложений, средний для верхнего слоя толщиной 1 *м*, из 12 проб, взятых в 1961 г. на четырех створах, приведен в таблице 41. В той же таблице представлен осредненный состав поверхностного слоя донных отложений, взятых на восьми створах песчаного приустьевого участка. Фракционный анализ проводился по методу Сабанина, поэтому к содержанию фракции $d<0{,}01$ *мм* также вводилась поправка.

ТАБЛИЦА 41

Фракционный состав донных отложений р. Вахш на приустьевом (песчаном) **участке**

Год	Состав	Содержание фракций, %, при d, *мм*				Число проб
		<0,01	0,01—0,05	0,05—0,25	>0,25	
1960	По данным САОГидропроекта	11,16	17,65	69,63	1,56	8
1960	Расчетный	2,48	26,33	69,63	1,56	8
1961	По данным САОГидропроекта	21,53	31,75	37,88	8,84	12
1961	Расчетный	4,78	48,50	37,88	8,84	12
1960—1961	Расчетный	3,63	37,42	53,75	5,20	20

На валунно-галечниковом участке камней с $d>100$ *мм* содержится в отложениях 14,5%, а с $d=100$—80 *мм* — 51,6%.

За период май — август средний уклон р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки равен 0,000244, а на участке Керки — Ильчик за этот же период — 0,000222. Ниже Ильчика уклон реки резко снижается: на участке Ильчик — Туя — Муюн до 0,000189, а на участке Туя — Муюн — Чатлы — до 0,000163.

Близкое к динамическому равновесию состояние русла р. Аму-Дарьи на участке Керки — Ильчик (301 *км*) подтверждается близкими между собой расходами взвешенных наносов в створах Керки и Ильчик. В 1961 г. среднегодовой расход взвешенных наносов в створе Керки был 5300 *кг/сек*, в створе Ильчик — 5200 *кг/сек*, а в 1959 г. — соответственно 7400 и 7600 *кг/сек*. Значительное снижение среднегодовых расходов взвешенных наносов в створе Ильчик по сравнению со створом Керки в 1955 и 1956 гг. является следствием разного метода отбора проб на мутность.

Ниже створа Ильчик в связи со снижением уклонов реки имеет место постепенное повышение отметок русла, особенно ниже створа Туя-Муюн по мере приближения к дельте реки.

При осветлении потока р. Аму-Дарьи на 34,5% после постройки Нурекской ГЭС на участке от места слияния рр. Вахш и Пяндж до створа Ильчик будет происходить размыв русла. Поток на этом участке будет пополнять свою мутность, пока не наступит равновесие между насыщением потока и его транспортирующей способностью, при несколько меньшем уклоне.

Прогноз руслового режима Аму-Дарьи дан на основании приведенных выше положений. Уклон русла для последующих расчетов принят средний между уклонами на участке Бассага и Керки — Ильчик: $i = \frac{0{,}000244 + 0{,}000222}{2} = 0{,}000233$. Средний расход в паводок (май — август) равен $Q = 3513$ *м³/сек*; ширина формируемого потоком русла $B = 0{,}16\sqrt{\frac{Q}{i}} = 0{,}16\sqrt{\frac{3513}{0{,}000233}} = 630$ *м*.

$$q = \frac{Q}{B} = \frac{3513}{630} = 5{,}59 \text{ м}^3/\text{сек};$$

$$H_{ср} = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}}\right)^{3/5} = \left(\frac{0{,}02 \cdot 5{,}59}{0{,}000233}\right)^{3/5} = 3{,}31 \text{ м};$$

$$v_{ср} = \frac{q}{H} = \frac{5{,}59}{3{,}31} = 1{,}69 \text{ м/сек};$$

$$u_в = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\,i^{1/4} = 0{,}065\,(1{,}69 - 0{,}05) \cdot 0{,}000233^{1/4} = 0{,}0132 \text{ м/сек} = 13{,}2 \text{ мм/сек};$$

$$c_{тп} = 200\ u_{вп} = 2{,}64 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{тп_2} = c_{тп}\left(\ln\frac{u_в}{w_1} - \frac{u_в - w_1}{u_в}\right) = 2{,}64\left(\ln\frac{13{,}2}{0{,}075} - \frac{13{,}2 - 0{,}075}{13{,}2}\right) = 11{,}0 \text{ кг/м}^3,$$

где $\rho_{тп_2}$ — транспортирующая способность потока р. Аму-Дарьи на участке от начала реки до створа Ильчик после строительства Нурекской ГЭС.

Определяем необходимые для расчетов значения $c_{оп_2}$ и $u_{д_2}$.

Мутность потока в начале р. Аму-Дарьи $\rho_{оц_2} = 3{,}05$ *кг/м*³.

$$c_{оп_2} = \frac{\rho_{оп_2}}{\ln \frac{w_{(n+1)\,п}}{w_1} - \frac{w_{(n+1)\,п} - w_1}{w_{(n+1)\,п}}} = \frac{3{,}05}{\ln \frac{12{,}5}{0{,}075} - \frac{12{,}5 - 0{,}075}{12{,}5}} =$$

$$= 0{,}74 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_д = 0{,}73\, u_д \left[\ln \frac{u_д}{u_{вп}} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right) w_{\min д}\right] = 0{,}73 \cdot 0{,}494 \left[\ln \frac{492}{13{,}2} - \right.$$

$$\left. - \left(\frac{1}{0{,}00132} - \frac{1}{0{,}402}\right) 0{,}0193\right] = 1{,}2 \text{ кг/м}^3.$$

Наибольший диаметр частиц донных наносов, которые перемещает поток р. Аму-Дарьи после постройки Нурекской ГЭС, определяется из равенства (128 а).

$$d_{\max}\left(\lg \frac{8{,}8H}{d_{\max}}\right)^2 = 0{,}053v^2;$$

$$d_{\max}\left(\lg \frac{8{,}8 \cdot 3{,}31}{d_{\max}}\right)^2 = 0{,}053 \cdot 1{,}69^2 = 0{,}151;$$

$$d_{\max} = 13{,}5 \text{ мм}; \quad u_{д_2} = 494 \text{ мм/сек}.$$

При расчете размыва русла р. Аму-Дарьи на участке от начала до створа Ильчик использован метод А. Г. Хачатряна, изложенный в главе II настоящей работы.

Для предельного насыщения потока донными и взвешенными наносами при размыве донных отложений в каждый кубический метр воды необходимо подавать $m_{гр}$ весовых единиц наносов. За весовую единицу при размыве речных отложений принимают 1 *кг*. Соответствующая величина постоянной кривой распределения состава грунта основания будет $c_{гр} = 0{,}405$ (рис. 43). В зависимости от состава донных отложений в русле и величины транспортирующей способности потока последний может не полностью насыщаться наносами. Наименьшая гидравлическая крупность частиц донных отложений, которыми будет насыщен поток, равна $w_{\min д}$.

Кривые распределения транспортирующей способности потока в отношении взвешенных наносов $j_т = c_т\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_в}\right)$, начальной мутности $j_0 = c_0\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)гр}}\right)$, их разности $j = j_т - j_0$ и $j_{гр} = c_{гр}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)гр}}\right)$ приведены на рисунке 43.

Величину w_{xm} и соответствующую ей величину $m_{гр}$ определяют подбором при совместном решении уравнений (148) и (149) $u_{в_2} = 13{,}2$ *мм/сек*; $w_{(n+1)п_2} = 12{,}5$ *мм/сек*; $c_{тп} = 2{,}64$ *кг/м*^{3}; $c_{гр} = 0{,}405$; $w_{(n+1)гр} = 60{,}1$ *мм/сек*.

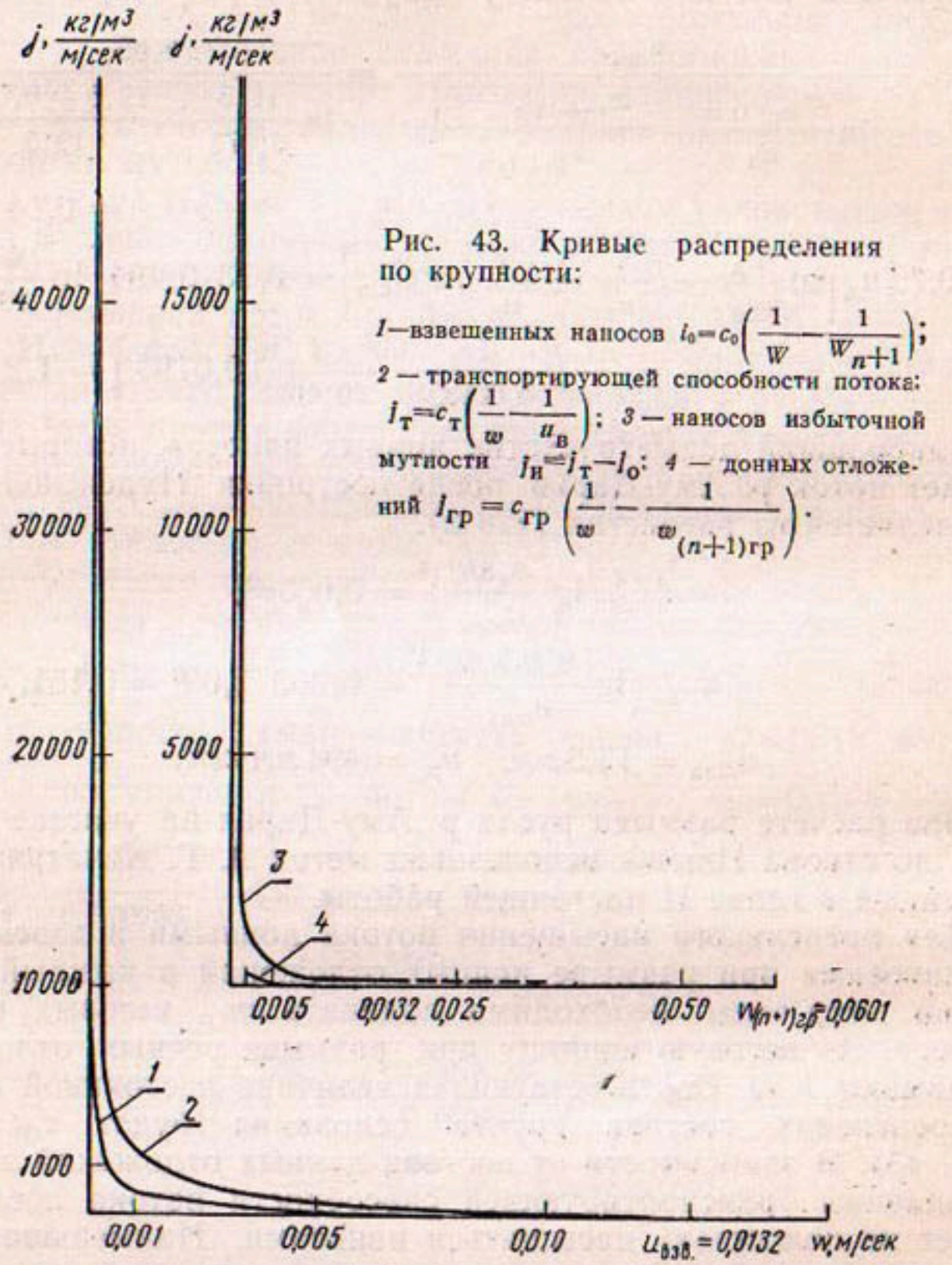


Рис. 43. Кривые распределения по крупности:

1 — взвешенных наносов $i_0 = c_0\left(\frac{1}{W} - \frac{1}{W_{n+1}}\right)$; *2* — транспортирующей способности потока: $j_т = c_т\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_в}\right)$; *3* — наносов избыточной мутности $j_и = j_т - i_0$; *4* — донных отложений $j_{гр} = c_{гр}\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{(n+1)гр}}\right)$.

Точка пересечения кривых $m_1' = f_1(w_{xm})$ и $m_2' = f_2(w_{xm})$ (рис. 44) даст искомое значение w_{xm}, при котором $m_1' = m_2' = m_{гр}$.

В нашем случае $w_{xm} = 4{,}7$ *мм/сек*, $m_1' = m_2' = m_{гр} = 3{,}3$ при $w_{\min д} = w_{xm}$;

$$\rho_{д_2} = 0{,}73 u_д \left[\ln \frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д}\right) w_{\min д}\right] =$$

$$= 0{,}73 \cdot 0{,}492 \left[\ln \frac{492}{13{,}2} - \left(\frac{1}{0{,}0132} - \frac{1}{0{,}492} \right) 0{,}0047 \right] = 1{,}176 \; кг/м^3.$$

Расчетом получено, что каждый кубометр расхода может размывать $\rho'_{п_2} = m_{гр} = 3{,}3$ *кг* донных отложений. В расчетах не было учтено количество донных наносов, транспортируемых

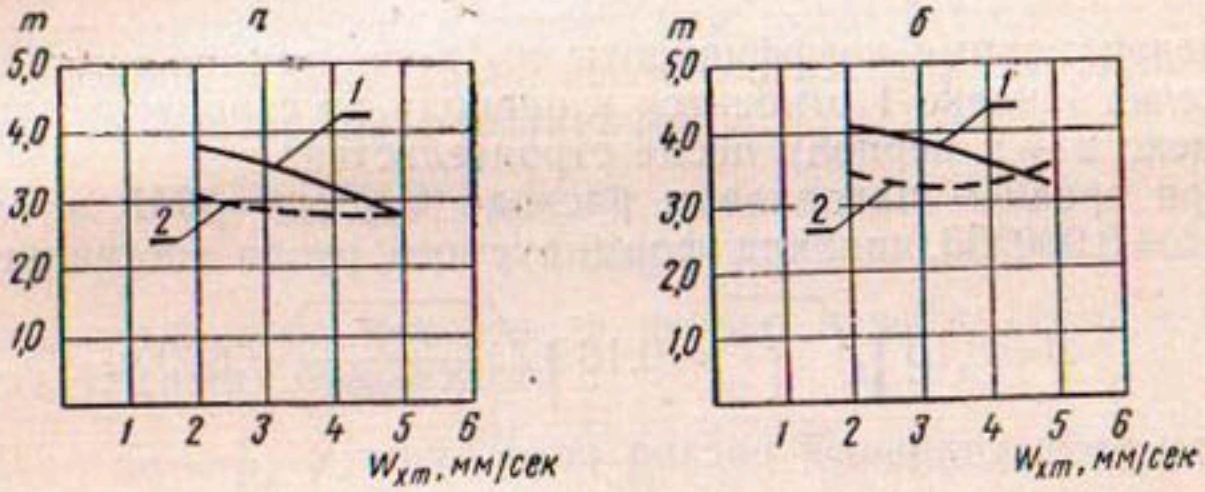


Рис. 44. Кривые $m = f(w_{xm})$ р. Аму-Дарьи на участке Бассага — Керки:

а — до постройки Нурекской ГЭС W_{xm}=5 *мм/сек*, m=2,76 *кг/м*³; *б* — после постройки Нурекской ГЭС w_{xm}=4,7 *м/сек*, m=3,3 *кг/м*³; *1* — $m_1 = f(x_m)$; *2* — $m_2 = f(x_m)$.

р. Пяндж. Принимая количество донных наносов в р. Аму-Дарье, поступающих из р. Пяндж, равным 11% количества взвешенных наносов, получим:

$$\rho_{0д_2} = 0{,}11 \rho_{0п_2} = 0{,}11 \cdot 3{,}05 = 0{,}336 \; кг/м^3.$$

Количество наносов, вымываемых потоком из ложа р. Аму-Дарьи после возведения Нурекской ГЭС, должно быть уменьшено на эту величину:

$$\rho_{п_2} = \rho'_{п_2} - \rho_{0д_2} = 3{,}3 - 0{,}336 = 2{,}964 \; кг/м^3.$$

Из этого количества за счет образования донных наносов будет размыто:

$$\rho_{дп_2} = \rho_{д_2} = \rho_{0д_2} = 1{,}176 - 0{,}336 = 0{,}840 \; кг/м^3,$$

а в виде взвешенных наносов будет вымыто со дна:

$$\rho_{вп_2} = 2{,}964 - 0{,}84 = 2{,}124 \; кг/м^3.$$

Полученная величина $\rho_{вп_2}$ является явно завышенной, так как:

$$\rho_{0_2} + \rho_{вп_2} > \rho_{0_1},$$

где ρ_{0_1} — мутность реки на рассматриваемом участке до строительства Нурекской ГЭС ($\rho_{0_1} = 4{,}42$ *кг/м*³).

$$\rho_{0_2} + \rho_{вп_2} = 3{,}05 + 2{,}124 = 5{,}174 \; кг/м^3.$$

Такое положение является, очевидно, следствием того, что р. Аму-Дарья теряет часть энергии потока на меандрирование в пойме шириной 2—4 *км*, на размыв берегов. Количество наносов, вымываемых кубометром воды р. Аму-Дарьи, после строительства Нурекской ГЭС выражается формулой:

$$\rho_р = \left[(m_2 - \rho_{0д_2}) - (m_1 - \rho_{0д_1})\right], \qquad (238)$$

где безразмерные коэффициенты m_2 и m_1 помножены на $\rho_{гр} = 1$ *кг/м*³. Индекс 1 относится к периоду до строительства ГЭС, а индекс 2 — к периоду после строительства.

При среднем паводковом расходе $Q_{ср.\,пов} = 3947$ *м*³/*сек*, уклоне $i = 0{,}000233$, ширина формируемого русла составляет:

$$B = 0{,}16\sqrt{\frac{Q}{i}} = 0{,}16\sqrt{\frac{3947}{0{,}000233}} = 660\,м.$$

При этом удельный расход реки будет:

$$q = \frac{3947}{660} = 5{,}99\,м^3/сек,$$

а средняя глубина:

$$H = \left(\frac{nq}{\sqrt{i}}\right)^{3/5} = \left(\frac{0{,}02 \cdot 5{,}99}{\sqrt{0{,}000233}}\right)^{3/5} = 3{,}46\,м.$$

Средняя скорость течения в сформированном русле:

$$v = \frac{q}{H} = \frac{5{,}99}{3{,}46} = 1{,}73\,м/сек,$$

взвешивающая скорость потока:

$$u_{в_1} = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\,i^{1/4} = 0{,}065\,(1{,}73 - 0{,}05)\,0{,}000233^{1/4} =$$

$$= 0{,}0135\,м/сек = 13{,}5\,мм/сек;$$

$$c_т = 200u_в = 2{,}7\,кг/м^3.$$

Наибольший диаметр донных наносов, которые могут перемещаться потоком р. Аму-Дарьи на рассматриваемом участке в бытовых условиях, d_{max} определяется из равенства:

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8H}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053v^2;$$

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8 \cdot 3{,}46}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053 \cdot 1{,}73^2;$$

откуда $d_{max} = 14$ *мм*; $u_д = 503$ *мм/сек*;

$$\rho_{д_1} = 0{,}73 \cdot 0{,}503\left[\ln\frac{503}{13{,}5} - \left(\frac{1}{0{,}0135} - \frac{1}{0{,}503}\right)0{,}00193\right] = 1{,}28\,кг/м^3.$$

Расчетами установлено, что в бытовых условиях $m'_2 = m'_1 = m = 2{,}76$ при $w_{xm} = 5{,}0$ *мм/сек* (рис. 43). Следовательно, в бы-

товых условиях поток обладает промывной способностью $\rho'_{п_1} = 2{,}76$ *кг/м³*. С учетом донных наносов размывающая способность р. Аму-Дарьи до строительства Нурекской ГЭС может быть выражена как

$$\rho_{п_1} = \rho'_{п_1} - \rho_{0д_1} = 2{,}76 - 0{,}11 \cdot 4{,}42 = 2{,}27 \text{ кг/м}^3.$$

Количество наносов, которое будет вымываться каждым кубометром воды р. Аму-Дарьи после сооружения Нурекской ГЭС, согласно равенству (238) составляет:

$$\rho_п = \left|(m_2 - \rho_{0д_2}) - (m_1 - \rho_{0д_1})\right| =$$
$$= [(3{,}3 - 0{,}336) - (2{,}76 - 0{,}49)] = 0{,}694 \text{ кг/м}^3.$$

Сток смываемых наносов за период паводка (май — август месяцы, 123 дня) составляет:

$$w_п = \rho_п \cdot V_в = \frac{0{,}694 \cdot 3513 \cdot 86\,400 \cdot 123}{10^3} = 25{,}8 \cdot 10^6 \text{ т}.$$

Принимая среднюю ширину русла $B_{ср} = \frac{630 + 660}{2} = 645$ *м* (630 *м* — в начале размыва, 660 *м* — в конце) при расстоянии от начала р. Аму-Дарьи до створа Ильчик 1437—760=677 *км*, подсчитывают площадь дна реки $F = 677\,000 \cdot 645 = 436 \cdot 10^6$ *м²*. Средняя толщина слоя размыва за период паводка составит при объемном весе отложений $\gamma_п = 1{,}4$ *т/м³*.

$$h_{р.ср} = \frac{25{,}8 \cdot 10^6}{1{,}4 \cdot 436 \cdot 10^6} = 0{,}042 \text{ м} = 4{,}2 \text{ см}.$$

При распределении глубин размыва по треугольнику с вершиной в начале реки максимальная глубина размыва в этом месте равна:

$$h_{р\,max} = 2h_{р.ср} = 2 \cdot 0{,}042 = 0{,}084 \text{ м} = 8{,}4 \text{ см}.$$

Глубина размыва при входе в Каракумский канал в 310 *км* ниже начала реки (створ Бассага) будет:

$$h_{р.Б} = 0{,}084 - \frac{0{,}084 \cdot 310}{677} = 0{,}045 \text{ м} = 4{,}5 \text{ см}.$$

Средняя за весь период глубина размыва в этом районе равна $\frac{h_{р.Б}}{2} = 2{,}25$ *см*, или 2—3 *см* за один паводок.

В меженный период (январь — апрель, сентябрь — декабрь месяцы, 242 дня) среднемноголетний расход р. Аму-Дарьи до строительства Нурекской ГЭС составлял $Q_1 = 1276$ *м³/сек*, после строительства с учетом попусков из водохранилища $Q_2 = 1494$ *м³/сек*.

Средневзвешенная мутность потока р. Аму-Дарьи за меженный период до и после строительства ГЭС $\rho_{0_1} = 2{,}17$ *кг/м³* и $\rho_{0_2} = 1{,}55$ *кг/м³*.

Расчетами, аналогичными вышеприведенным, установлено, что каждый кубометр стока р. Аму-Дарьи после сооружения Нурекской ГЭС вымывает из русла $\rho = 0{,}218$ *кг/м*³ отложений.

Сток вымытых наносов за меженный период равен:

$$w_р = \frac{0{,}218 \cdot 242 \cdot 1494 \cdot 86\,400}{10^3} = 6{,}80 \text{ млн. } т.$$

Средняя толщина слоя вымытых наносов на участке от начала реки до створа Ильчик:

$$h_{р.ср} = \frac{6{,}80 \cdot 10^6}{1{,}4 \cdot 390 \cdot 67\,700} = 0{,}018 \, м.$$

Принимая распределение размыва по треугольнику, получим наибольшую за меженный период величину размыва в начале реки:

$$h_{р\,max} = 2h_{р.ср} = 0{,}036 \, м = 3{,}6 \, см.$$

В голове Каракумского канала наибольший размыв равен:

$$h_{р.Б.max} = 0{,}036 - \frac{0{,}036 \cdot 310}{677} = 0{,}02 \, м = 2 \, см.$$

Наибольший размыв в районе водозабора Каракумского канала (створ Бассага) в первый период после сооружения Нурекской ГЭС составляет $h_{р.пав.} + h_{р.меж.} = 4{,}5 + 2{,}0 = 6{,}5$ *см* в год.

С учетом затухания процесса размыва по мере снижения уклона реки среднегодовой размыв дна р. Аму-Дарьи составит примерно 3 *см* в год.

Размыв прекратится после снижения уклона русла до величины, при которой $m = 2{,}76$, т. е. до величины m в бытовых условиях или до сооружения Нурекской ГЭС (рис. 44). При $i = 0{,}000233$ величина $m = 3{,}3$; при $i = 0{,}00022$ $m = 2{,}84$ и при $i = 0{,}000218$ $m = 2{,}76$.

При уклоне на участке от начала реки до створа Ильчик $i = 0{,}000218$ отметка дна реки в районе входа в Каракумский канал снизится на величину:

$$\Delta h = (0{,}000244 - 0{,}000218)\,66\,000 + (0{,}000222 - 0{,}000218) \cdot 301\,000 = 2{,}92 \, м,$$

где 66 000 — расстояние в метрах от створа Бассага до Керки, а 301 000 — от Керки до створа Ильчик.

Приведенные данные показывают, что размыв русла р. Аму-Дарьи после строительства Нурекской ГЭС будет продолжаться длительный период (80—100 лет).

Приведенные в таблицах 40 и 41 данные показывают, что состав песчаных фракций отложений на галечниковом участке от створа Нурекской ГЭС вниз по реке (протяженностью 200—210 *км*) близок к составу отложений на приустьевом участке (протяженностью 50—60 *км*). Ниже приведен расчет интенсив-

ности вымыва песчаных фракций из отложений на галечниковом участке. Интенсивность вымыва отложений на приустьевом участке близка к интенсивности вымыва песчаных фракций на галечниковом участке ввиду сходности фракционных составов отложений.

Средний расход р. Вахш за период май — август после строительства Нурекской ГЭС $Q = 930$ *м³/сек*, уклон на этом участке $i = 0{,}00252$. Поток выходит из водохранилища ГЭС полностью осветленным ($\rho = 0$).

Ширина формируемого русла

$$B = 0{,}14\sqrt{\frac{Q}{i}} = 0{,}14\sqrt{\frac{930}{0{,}00252}} = 85\,м.$$

До сооружения Нурекской ГЭС средний расход р. Вахш в ее створе за период май — август 1363 *м³/сек*; средняя мутность потока 4,92 *кг/м³*; предельная гидравлическая крупность взвешенных наносов, определенная по нашим исследованиям в 1959 г., $w_{n+1} = 38{,}3$ *мм/сек*, $w_1 = 0{,}031$ *мм/сек*; ширина формируемого потоком русла

$$B = 0{,}14\sqrt{\frac{Q}{i}} = 0{,}14\sqrt{\frac{1363}{0{,}00252}} = 103\,м.$$

Расчетами по приведенной выше методике было установлено, что после строительства Нурекской ГЭС $m_2 = 59$ при $w_{xm_2} = 2$ *мм/сек*, а до сооружения ГЭС $m_1 = 58$ при $w_{xm_1} = 2{,}5$ *мм/сек*.

Каждый кубометр воды р. Вахш будет вымывать донные отложения в количестве $m_{гр} = [m_2 - (m_1 - 0{,}11\ \rho_0)] = 59 - (58 - 0{,}11 \cdot 4{,}92) = 1{,}546$ *кг*. После возведения Нурекской ГЭС донные наносы не проникают ниже ее створа, расход донных наносов до постройки равен 11% количества взвешенных.

Количество донных отложений, смываемых за один паводок (май — август), составляет:

$$W_р = \frac{1{,}546 \cdot 86\,400 \cdot 930 \cdot 123}{10^3} = 15{,}2 \cdot 10^6\,т.$$

Если распространить этот объем на весь участок р. Вахш от створа Нурекской ГЭС до устья, то средняя толщина смываемого за один паводок слоя при объемном весе отложений $\gamma_н = 1{,}40$ *т/м³* и при средней ширине русла $B = 100$ *м* равна:

$$h_{р.ср} = \frac{15{,}2 \cdot 10^6}{1{,}4 \cdot 259\,000 \cdot 100} = 0{,}42\,м.$$

Расстояние от устья до створа Головной ГЭС принято 173 *км*, от створа Головной ГЭС до Нурекской — 86 *км*, всего от устья до створа Нурекской ГЭС — 259 *км*.

Следовательно, на участке р. Вахш от створа Нурекской ГЭС до устья за один паводок будет размываться слой донных

отложений толщиной 0,4 *м*. При такой интенсивности размыва за 2—3 года весь мелкий материал из верхних слоев донных отложений будет вымыт и на дне образуется отмостка из валунов и крупной гальки. Наличие приустьевого песчаного участка протяженностью 50—60 *км* не вносит существенных изменений в вышеуказанные сроки размыва отложений р. Вахш после возведения Нурекской ГЭС вследствие относительно малого объема возможного размыва.

По сравнению с твердым стоком р. Аму-Дарьи в створе Керки, который при отключении стока р. Вахш составит более 150 млн. $м^3$; объемы размыва на р. Вахш относительно невелики и поэтому не окажут существенного влияния на размыв русла р. Аму-Дарьи.

§ 25. Промыв отложений из водохранилищ и мероприятия по сокращению их заиления

Опыт эксплуатации плотинных гидроузлов показывает, что эффективным мероприятием по борьбе с заилением верхних бьефов является их периодический промыв.

При промыве верхнего бьефа Земо-Авчальской ГЭС (ЗАГЭС) суточный объем удаляемых наносов достигал более 1 млн. $м^3$ при расходах воды 443—525 $м^3/сек$ [9]. Есть сведения об эффективности промыва отложений на Краснополянской и Гизельдонской ГЭС [33]. Периодически промывается верхний бьеф низконапорного Чумышского гидроузла на р. Чу (Киргизская ССР). При нашем обследовании в мае 1959 г. установлено, что верхний бьеф Чумышского гидроузла с заилением 25 000 $м^3$ промывается за 12 часов при расходе 60 $м^3/сек$, пропускаемом через два отверстия правобережного отстойника и один пролет плотины.

Периодический промыв верхнего бьефа может применяться на низконапорных гидроузлах на р. Аму-Дарье. Наиболее эффективна промывка при пропуске через заиленный бьеф паводковых расходов и полном снижении подпора. Для выполнения последнего условия ширина водосбросного фронта плотины должна быть близка к бытовой ширине реки (например, для условий Кизыл-Аякского гидроузла 600—700 *м*). Верх порога водосбросных отверстий плотины должен быть на уровне среднего дна реки. Промыв отложений из верхнего бьефа может производиться 1 раз в 2—3 года.

В 1963—1964 гг. исследования по заилению и промыву верхнего бьефа проводились на крупномасштабной модели Кизыл-Аякского гидроузла на р. Аму-Дарье. Модель была построена на Дмитровском опорном пункте ВНИИГиМ, горизонтальный

масштаб модели 1 : 200, вертикальный 1 : 40, уклон дна (до заиления) 0,0012, длина модели 140 *м*, ширина русла поверху 3,3 *м*, наибольшая ширина русла с поймой 19 *м*, наибольшая глубина русла 11,5 *см*, при подпоре 18 *см*. Русло на модели имеет три меандры, соответствующие натурным (рис. 45). Перед регулирующим сооружением был устроен подводящий канал шириной 3,65 *м*, длиной 3,35 *м* (рис. 45).

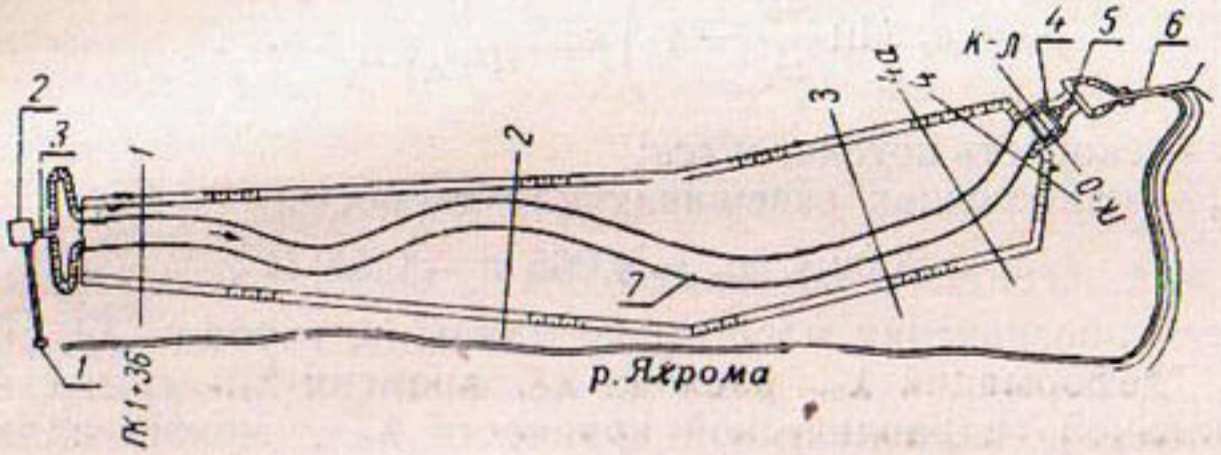


Рис. 45. План модели верхнего бьефа гидроузла:
1 — насосная станция; *2* — напорный бак; *3* — треугольный водослив; *4* — регулирующее сооружение; *5* — трапецеидальный водослив; *6* — сбросной лоток; *7* — русло.

В качестве наносов на модели использовали песок близлежащего карьера «Красная горка». Фракционный состав этого песка близок к фракционному составу донных отложений р. Аму-Дарьи в районе Кизыл-Аякского гидроузла, но отличается большим содержанием фракции с $d > 0{,}05$ *мм*. В применяемом песке содержание фракции $d > 0{,}10$ *мм* составляет 26,10%, $d = 0{,}10—0{,}05$ *мм* — 59,26% и $d < 0{,}05$ *мм* — 14,64%. Перед подачей на модель песок смешивали с водой в специальном бункере, смесь равномерно распределяли по ширине потока.

При исследованиях измеряли мутность потока по длине верхнего бьефа и на сбросе вакуум-батометром и бутылками определяли фракционный состав наносов, отбирали пробы донных отложений и определяли их фракционный состав и объемный вес, замеряли распределение продольных скоростей, нивелировали поверхность отложений до и после каждого опыта, зарисовывали направление поверхностных токов.

Ниже приведены краткие результаты исследований.

Гидравлические элементы потока моделировались по Фруду, при пересчете модельных деформаций на натуру учитывали соотношение транспортирующей способности потока на модели и в натуре.

Проведенное нами сопоставление расчетной и измеренной транспортирующей способности потока показало, что удовлетворительное совпадение с опытными данными дают формулы, в которых транспортирующая способность потока пропорцио-

нальна скорости в степени, близкой к квадрату. Анализ формулы А. Г. Хачатряна, которая дает удовлетворительные результаты как в натурных условиях, так и в модельных, показывает, что транспортирующая способность потока пропорциональна скорости v в степени 1,8 и обратно пропорциональна минимальной гидравлической крупности w_1 наносов в степени 0,25 и глубине потока H в степени 0,4, т. е.:

$$\rho_т = c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_1} - 1 \right) \cong k \frac{v^{1,8}}{H^{0,4} w_1^{0,25}} \; кг/м^3, \qquad (239)$$

где v — скорость потока, *м/сек*;

$u_в$ — наибольшая взвешивающая скорость;

$$c_т = 200 u_в; \quad u_в = 0{,}065 (v - 0{,}05) i^{1/4}.$$

Введя обозначения масштабов: длины λ_l, глубины λ_h, скорости λ_v, деформаций $\lambda_д$, расхода λ_Q, времени λ_t, мутности λ_ρ, минимальной гидравлической крупности λ_{w_1}, можно написать ($\lambda_{\rho_т}$ — масштаб транспортирующей способности):

$$\lambda_д = \lambda_\rho \cdot \lambda_Q \cdot \lambda_t; \quad \lambda_Q = \lambda_l \lambda_h^{3/2}; \quad \lambda_t = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\lambda_h}}; \quad \lambda_\rho = k' \lambda_{\rho_т}; \quad k' \cong 1;$$

$$\lambda_\rho \cong \lambda_{\rho_т} = \lambda_v^{1,8} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25} \cdot \lambda_h^{-0,4} = \lambda_h^{0,5(1,8)} \lambda_{w_1}^{-0,25} \cdot \lambda_h^{-0,4} =$$

$$= \lambda_h^{0,5} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25}; \qquad (240а)$$

$$\lambda_д = \lambda_\rho \cdot \lambda_Q \cdot \lambda_t = \lambda_h^{0,25} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25} \cdot \lambda_l \cdot \lambda_h^{1,5} \cdot \lambda_l \cdot \lambda_h^{-0,5} =$$

$$= \lambda_l^2 \cdot \lambda_h^{1,5} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25}. \qquad (240б)$$

При определении масштаба минимальной гидравлической крупности исходим из фракционного состава взвешенных наносов р. Аму-Дарьи по данным наших исследований 1955—1958 гг. в голове Каракумского канала и среднего фракционного состава проб карьерного грунта, отобранных в 1964 г. (табл. 42).

Исходя из предварительных расчетов и результатов исследований, которые показали, что осветление потока в верхнем бьефе составит примерно 65—70%, принимаем минимальную гидравлическую крупность осаждаемых в верхнем бьефе наносов $w_{1,н} = 0{,}21$ *мм/сек* (гидравлическая крупность частиц с $d = 0{,}015$ *мм* при $t = 20°$ С). Фактически частицы с $d < 0{,}015$ *мм* будут осаждаться, но в таком небольшом количестве, которым в данном случае можно пренебречь. Тогда:

$$\lambda_{w_1}^{-0,25} = \frac{1}{\lambda_{w_1}^{0,25}} = \left(\frac{w_{1,м}}{w_{1,н}} \right)^{1/4} = \left(\frac{0{,}62}{0{,}21} \right)^{1/4} = 1{,}31;$$

$$\lambda_\rho = \lambda_h^{0,5} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25} = \sqrt{40} \cdot 1{,}31 = 8{,}26;$$

$$\lambda_д = \lambda_l \cdot \lambda_h^{3/2} \cdot \lambda_{w_1}^{-0,25} = 200^2 40 \sqrt{40} \cdot 1{,}31 = 13{,}3 \cdot 10^6$$

ТАБЛИЦА 42

Фракционный состав взвешенных наносов р. Аму-Дарьи и карьерного песка

Наименование, число проб, время отбора	Фракционный состав, %, при d, мм							w_{n+1}, мм/сек	w_1, мм/сек
	<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	0,05—0,10	0,10—0,25	>0,25		
Взвешенные наносы р. Аму-Дарьи в голове Каракумского канала. 100 проб 1955—1958 гг.	9,41	26,21	31,03	8,44	19,34	4,94	0,63	17,8	0,058
Песок Дмитровского карьера «Красная горка», 8 проб 1964 г.	1,52	1,69	4,75	7,76	60,99	18,14	5,15	54,4	0,62

При промывках верхнего бьефа наносы в поток не подавались, в начальном створе модели мутность потока была в пределах 0,1—0,2 *кг/м*³. В связи с этим при пересчете данных опытов на натуру следует учитывать насыщенность речного потока наносами. Пересчет модельных объемов размыва на натуру можно производить: по стоку смываемых наносов или по замеренному при помощи нивелировок объему размыва на модели.

Сток смываемых наносов на модели определяют по формуле:

$$w_{\text{р.м.с}} = \frac{\Sigma (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{вх}}) Q_{\text{м}} \Delta t_{\text{м}}}{1000} T, \qquad (241)$$

где $\rho_{\text{к}}$ — мутность потока в конце модели, *кг/м*³, измеренная через определенные промежутки времени;

$\rho_{\text{вх}}$ — мутность потока в начальном створе модели, *кг/м*³;

$Q_{\text{м}}$ — расход на модели, *м*³/*сек*;

$\Delta t_{\text{м}}$ — интервал времени, *сек*.

Сток смываемых наносов в натуре равен:

$$w_{\text{р.н.с}} = w_{\text{р.м.с}} \lambda_{\text{д}} - \frac{1{,}112 (\rho_0 - \lambda_\rho \cdot \rho_{\text{вхм}})}{1000} Q_{\text{н}} t_{\text{н}} T, \qquad (241\text{а})$$

где ρ_0 — мутность потока в натуре.

Объем смываемых в натуре наносов, определенный по стоку, будет:

$$V_{\text{р.м.с}} = \frac{w_{\text{р.н.с}}}{\gamma_{\text{н.н}}} \text{ м}^3. \qquad (242)$$

При замеренном нивелировкой объеме размыва до и после опыта на модели $V_{р.м}$ соответствующий объем размыва в натуре равен:

$$V_{р.н.з} = V_{р.м}\lambda_д \frac{\gamma_{н.м}}{\gamma_{н.н}} - \frac{1{,}112\,(\rho_0 - \lambda_\rho\,\rho_{вх})\,Q_н\,t_н}{\gamma_{н.н}}, \qquad (242а)$$

где $\gamma_{н.м}$ — объемный вес наносов на модели, *кг/м³*;

$\gamma_{н.н}$ — объемный вес наносов в натуре, *кг/м³*.

Коэффициент 1,112 принят для учета донных наносов, количество которых, по данным наших исследований, в голове Каракумского канала (1957 г.) составляет 11,2% от стока взвешенных наносов.

Для модели среднее насыщение потока наносами, размытыми в верхнем бьефе:

$$\rho_{пр.ср.м} = \frac{V_{р.м}\gamma_{н.м}}{Q_м t_м}\ кг/м^3. \qquad (243)$$

Для натуры:

$$\rho_{пр.ср.м} = \lambda_\rho\,\rho_{пр.ср.м} - 1{,}112\,(\rho_0 - \lambda_\rho \cdot \rho_{вх.м})\ кг/м^3. \qquad (243а)$$

Ниже приведен пересчет объемов заиления на натуру. Количество осевших наносов на модели, определяемое по стоку:

$$\omega_{з.м.с} = \frac{\Sigma\,(\rho_{вх} - \rho_к)\,Q_м \Delta t_м}{1000}\ т. \qquad (244)$$

Для натуры:

$$\omega_{з.н.с} = \frac{\Sigma\,(\rho_0 - \lambda_\rho\,\rho_м)\,Q_н\,t_н}{1000}\ т. \qquad (244а)$$

Объем заиления в натуре $V_{зн}$ *м³*:

$$V_{з.н} = \frac{\omega_{з.н.с}}{\gamma_{н.н}}. \qquad (245)$$

Перед каждым опытом промыва отложения в течение 10—12 часов находились под водой во избежание их уплотнения. При опытах у плотины сначала устанавливался уровень, соответствующий НПГ ($H = 18$ *см*), а к началу промывки уровень, соответствующий бытовому при данном расходе или близкий к нему.

Объемы размыва в верхнем бьефе при проведении опытов определялись по стоку смываемых наносов и по нивелировкам поверхности отложений до и после опытов (рис. 46). Для более точного определения стока смываемых наносов отбор проб на мутность ниже модели в начале сбросного лотка-быстротока производился через 15, 35, 60 минут от начала промывки и затем через каждый час до конца опыта.

Опыты промыва верхнего бьефа проводили на модели при расходах 80; 98,6; 118,5; 139,2; 158,0 *л/сек*, соответствующих

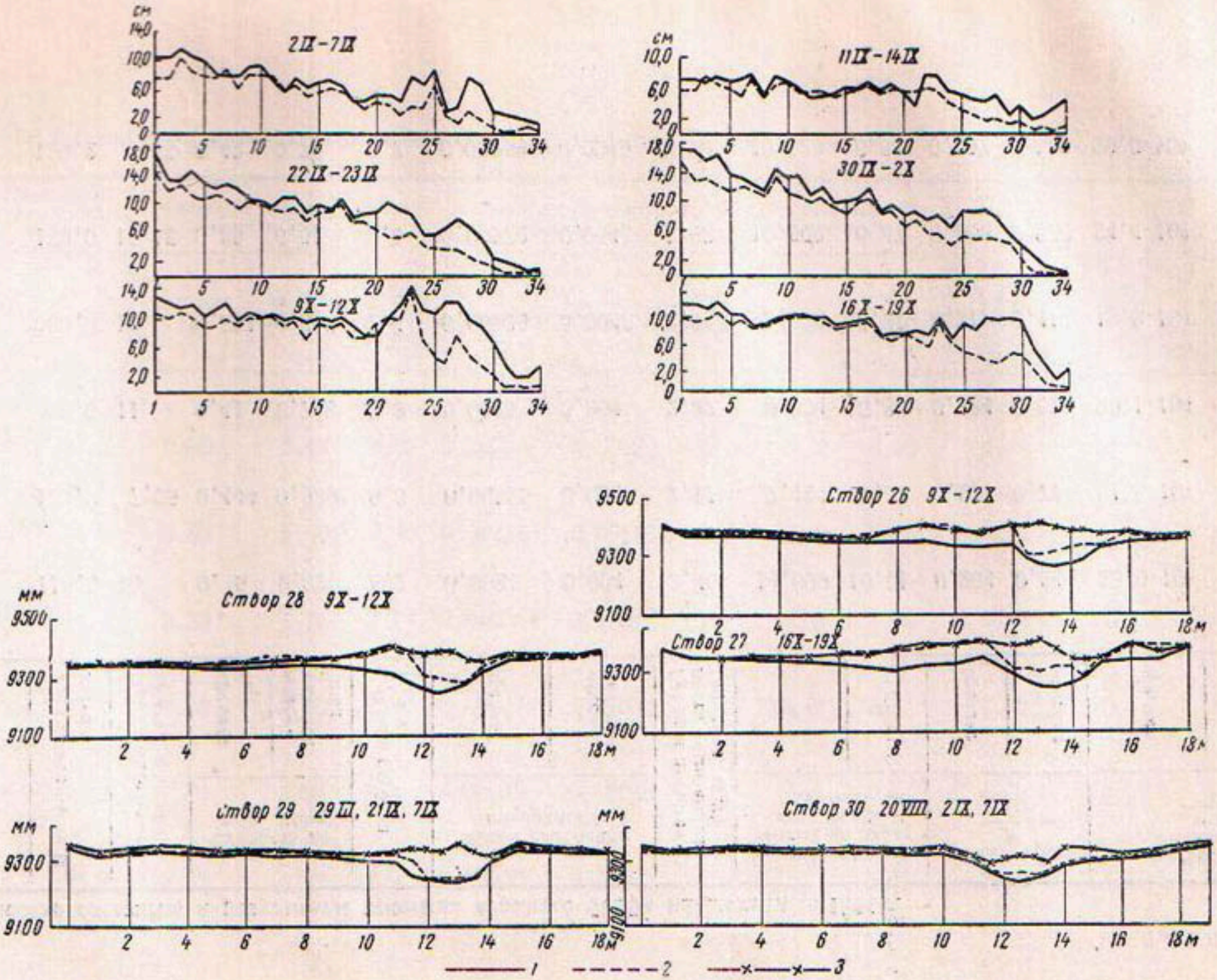


Рис. 46. Продольные (*а*) и поперечные (*б*) профили верхнего бьефа гидроузла:

1 — до промыва и до заиления; *2* — после промыва; *3* — после заиления.

ТАБЛИЦА 43

Гидравлические элементы и результаты промыва верхнего бьефа на модели в 1964 г.

№ опыта	Дата	Расход на модели $Q_м$, *л/сек*	Продолжительность опыта, час., мин.	Скорость потока, *м/сек*		Средняя глубина H, *см*	Уклон свободной поверхности		Средняя насыщенность смываемыми наносами, *кг/м³*	Количество промытых из верхнего бьефа наносов		Число Фруда $\frac{v^2}{gH}$		Число Рейнольдса $\frac{v \cdot H}{\nu}$	
				средняя $v_{ср}$	максимальная v_{max}		средний	максимальный		*т*	*м³*	среднее	максимальное	среднее	максимальное
1	5/IX	118,5	10	0,46	0,82	8,2	0,0024	0,004	3,46	14,699	10,11	0,264	0,84	$33,0 \cdot 10^3$	$59,0 \cdot 10^3$
2	12/IX	139,2	7,05	0,444	0,839	9,3	0,00225	0,004	2,11	7,494	4,82	0,217	0,77	$31,5 \cdot 10^3$	$59,6 \cdot 10^3$
3	23/IX	98,6	11	0,41	0,748	9,3	0,0025	0,004	2,32	9,034	5,83	0,184	0,614	$29,1 \cdot 10^3$	$53,2 \cdot 10^3$
4	1/X	80,0	12	0,391	0,545	7,4	0,00266	0,0045	2,34	8,076	5,21	0,21	0,41	$19,8 \cdot 10^3$	$27,6 \cdot 10^3$
5	10/X	158,0	10,15	0,39	0,51	9,5	0,00272	0,0045	1,82	10,602	6,87	0,163	0,278	$24,4 \cdot 10^3$	$31,9 \cdot 10^3$
6	17/X	139,2	9,15	0,42	0,70	9,7	0,00258	0,0049	2,29	10,623	6,88	0,187	0,518	$29,0 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$

ТАБЛИЦА 44

Гидравлические элементы и результаты промыва верхнего бьефа, приведенные к натуре

№ опыта	Расход в натуре, *л/сек*	Продолжительность промывки		Скорости при промывке, *м/сек*		Средняя глубина, *H*, *м*	Уклон свободной поверхности		Количество смытых наносов			Мутность промывного потока ρ_0, *кг/м³*	Количество смываемых наносов на 1 *м³* воды $\rho_{пр}$, *кг/м³*	Расход воды на 1 *м³* наносов, *м³*
		час.	сут.	средняя $v_{ср}$	наибольшая v_{max}		средний	наибольший	$W_р$, млн. *т*	$V_р$, млн. *т*	За 1 сутки млн. *т*			
1	6000	317	13,2	2,90	5,12	3,36	0,000544	0,00170	170,8	117,2	8,90	4,42	25	58
2	7000	225	9,4	2,80	5,30	3,72	0,000435	0,00155	78,2	54,0	5,76	4,42	13,9	104
3	5000	348,7	14,5	2,59	4,74	3,72	0,000374	0,00012	103,3	71,3	4,92	4,42	16,42	88,6
4	4000	380,4	15,8	2,48	3,45	2,96	0,000470	0,00094	87,2	60,2	3,81	4,42	16	90,7
5	8000	325	13,5	2,46	3,22	3,8	0,000323	0,00056	108,3	75,0	5,55	4,42	11,7	123
6	7000	293	12,2	2,65	4,42	3,9	0,000371	0,00103	110,7	76,4	6,26	4,42	15,1	96

расходам в натуре 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 *м³/сек*. Перед первым опытом на модели осадилось 41,12 *м³* наносов. За первый опыт из верхнего бьефа было промыто 10,11 *м³*, за все шесть опытов 39,72 *м³* наносов. Характерным было образование участков (в конце модели) с повышенными уклонами и скоростями потока. Максимальные уклоны на модели превосходили средние в 1,6—2 раза. Величины скоростей и глубин потока, а также продолжительность промывок пересчитывали на натуру по Фруду. Уклоны свободной поверхности в натуре определяли по формуле $i = \frac{v^2}{C^2R}$. В связи со значительной разностью максимальной и средней скорости в натуре по сравнению с моделью максимальный уклон превосходил средний в 2—3,5 раза. Пересчет объемов размыва и мутностей на натуру проводили по методике, изложенной в предыдущем разделе.

Средняя насыщенность потока размываемыми в верхнем бьефе наносами составляла на модели 1,82—3,46 *кг/м³* (табл. 43), в натуре 11,7—25 *кг/м³* (табл. 44). Количество смытых из верхнего бьефа наносов при опытах на модели было в пределах 7,494—14,699 *т*, при пересчете в натуру 78,2—170,3 млн. *т* (табл. 43, 44). Средняя суточная производительность промывки для натуры составляет 3,8—8,9 млн. *м³* (табл. 44). Реальность приведенных цифр по среднесуточной производительности промывки верхнего бьефа и насыщению потока смываемыми наносами подтверждается данными результатов промывок верхнего бьефа ЗАГЭС [9], при которых суточная производительность промыва достигала 1 млн. *м³* при расходе 443—525 *м³/сек*, а средняя мутность потока на выходе — 42,1—33,7 *кг/м³*. По данным исследований А. Г. Нацвлишвили при промыве Баграм-Тапинского отстойника, мутность потока 10/V 1961 г. была 20,1 *кг/м³* при скорости 2,5 *м/сек* и составе наносов, близком к таковому в рассматриваемых условиях [18]. Значительный интерес в этом отношении представляют данные по промыву верхнего бьефа Чумышского гидроузла на р. Чу. Заиление его верхнего бьефа в объеме 25 000 *м³* промывалось за 12 часов при расходе 60 *м³/сек*. При этом расход воды на промыв 1 *м³* наносов составлял 104 *м³*, а средняя насыщенность промывного потока смываемыми наносами при их объемном весе 1,5 *т/м³* равнялась $\rho_{пр.ср} = 14{,}4$ *кг/м³*, что хорошо согласуется с соответствующими величинами, приведенными в таблице 44.

Опыты на заиление верхнего бьефа проводили при расходах 80; 98,6; 118,5; 139,2; 158 *л/сек*, продолжительность опытов на модели составляла от 18,5 до 66,8 часа, что в пересчете на натуру равно 585—2080 часам, или 24,4—86 суткам. Каждый из шести опытов проводили в течение нескольких суток большей частью по 11—13 часов в сутки. Глубина над порогом регули-

рующего сооружения в конце модели была 18 *см* (отметка верха порога соответствовала отметке дна русла на модели). Каждые сутки на модели измеряли мутность по длине верхнего бьефа.

Объемы осевших в верхнем бьефе наносов определяли по результатам нивелировок до и после проведения опытов и по разности стоков наносов в начале и в конце модели. Объемы осевших в верхнем бьефе наносов, определенные по этим методам, в большинстве случаев были близки между собой. Всего за шесть опытов в верхнем бьефе было осаждено 103,4 $м^3$ наносов. Значительное количество наносов отложилось в верхней части модели (створ 1 — створ 2—52 *м*), где объемы размывов были относительно невелики, что способствовало увеличению средних уклонов от 0,0012 до 0,002. Измерения динамики мутности по длине верхнего бьефа показали, что бо́льшая часть наносов с $d>0{,}25$ *мм* и $d>0{,}10$ *мм* осаждается между створами 1 и 2. Из общей мутности в створе 1 (2—4 $кг/м^3$) до створа 3 доходило 0,5—1 $кг/м^3$. У сброса мутность потока уменьшалась до 0,1 $кг/м^3$ в начале исследований и до 0,15—0,3 $кг/м^3$ на завершающей стадии опытов. Исследования показали, что, несмотря на малое содержание в песке частиц с $d<0{,}015$ *мм* и с $d<0{,}01$ *мм*, на модели были случаи частичного осаждения этих частиц в верхнем бьефе.

Измерения динамики мутности потока 25, 26 и 29 сентября 1964 г. при расходе на модели $Q_м=80{,}0$ $л/сек$ ($Q_н=4000$ $м^3/сек$) показали, что средняя мутность в створе 3 равнялась 0,702 $кг/м^3$, а средняя мутность потока на сбросе 0,240 $кг/м^3$. При масштабе мутности $\lambda\rho=8{,}26$ соответствующие мутности для натуры равны в створе 3—5,81 $кг/м^3$ и на сбросе 1,98 $кг/м^3$. Приведенные величины мутности сходны с полученными нами по рекомендуемому методу расчета заиления верхнего бьефа. Измерения мутности по глубине потока показали значительное увеличение ее ко дну.

Изложенные выше результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

Промыв верхнего бьефа при почти полном снижении подпора является высокоэффективным мероприятием (на модели промывалось 4,82—10,11 $м^3$ отложений за один опыт, что в пересчете на натуру равно 54,0—117,2 млн. $м^3$ за 9,4—15,8 суток). Суточная производительность промывки в натуре составляет 3,81—8,90 млн. $м^3$, расход воды на смыв 1 $м^3$ наносов 59,0—123,0 $м^3$.

Размыв распределяется на всю рабочую длину модели — 135,0 *м* (27,0 *км* в натуре). Около 50% общего объема размыва приходилось на нижний участок протяженностью 6,2 *км* (в натуре), 30% на средний участок (10,4 *км*) и 20% на верхний участок (10,4 *км*).

Интенсивность промыва меняется во времени. После первоначального снижения интенсивности промыва по мере разработки поперечного сечения русла на отдаленных от плотины створах увеличиваются расходы в русловой части потока за счет сокращения расхода по пойме, образуются участки с повышенными уклонами и скоростями и интенсивность промыва вновь повышается.

Интенсивность промыва не возрастает пропорционально увеличению расхода, так как при больших расходах часть их проходит по пойме с малыми скоростями. При одинаковом снижении подпора и заилении в верхнем бьефе наибольшая интенсивность промыва соответствует некоторому среднему расходу. В проведенных опытах диапазон расходов для натуры соответствовал 4000—8000 *м³/сек*, наиболее эффективным был промыв при расходе 6000 *м³/сек* (118,5 *л/сек* на модели).

Опыты на заиление показали, что мутность потока, которая была в начале чаши водохранилища (створ № 3) 0,5—1,0 *кг/м³* на модели (4,1—8,2 *кг/м³* в натуре) к концу модели снижалась в основной части опытов до 0,15—0,30 *кг/м³* (1,24—2,5 *кг/м³* в натуре), т. е. до величин, сходных с расчетными. Несмотря на малое содержание в составе подаваемых на модель наносов частиц с $d<0{,}015$ *мм* и $d<0{,}01$ *мм*, часть их иногда осаждалась.

По глубине потока во всех случаях мутность заметно увеличивалась от поверхности ко дну, в том числе и в створах, расположенных вблизи плотины, где в потоке оставались в основном наиболее мелкие фракции.

Ниже кратко изложены возможные мероприятия по сокращению заиления водохранилищ при различных условиях. Сократить заиление водохранилищ в тех случаях, когда их емкость недостаточна для полного регулирования жидкого стока и значительная часть его проходит транзитом, подвергаясь почти полному осветлению, можно путем пропуска этого стока в обход по сбросному каналу, устроенному для этой цели на одном из берегов. Такое мероприятие запроектировано для 1-го Тедженского водохранилища. При аналогичных условиях в отношении регулирования стока и топографии этот способ можно применять и на других водохранилищах.

Другим мероприятием по сокращению заиления водохранилищ является устройство водосбросного сооружения с шириной водосливного фронта, равной или близкой к бытовой ширине реки и с порогом на уровне бытового дна, что позволяет периодически снижать или полностью снимать подпор, пропускать мутный поток в нижний бьеф и проводить промыв отложений.

При расположении водохранилища на реке, твердый сток которой формируется за счет притоков, доля которых в жидком стоке незначительна, борьбу с заилением можно вести путем аккумуляции наносов, в водохранилищах, специально устроен-

ных на притоках. Примером служит Таш-Кепринское водохранилище на р. Мургаб, которое было введено в эксплуатацию в ноябре 1940 г. Водосбросное сооружение его имеет три пролета по 6 *м* в свету каждый и порог, расположенный на 10 *м* выше бытового дна реки.

По проекту для пропуска максимального расхода $Q=450$ *м*³/*сек* требуется напор над порогом 8,5 *м*. Проектный объем водохранилища, равный 166 млн. *м*³, к 1962 г. был заилен примерно на 75%, в том числе мертвый объем, равный 18,25 млн. *м*³. Вследствие заиления дно р. Мургаб на подходе к чаше водохранилища поднялось на 3,5 *м*, а в самой чаше на 9—11 *м* (рис. 47). В связи с распространением подпора на верхнем участке реки, вызванного заилением, была затоплена территория, расположенная выше первоначальной чаши водохранилища, и потребовались большие работы по строительству обвалования.

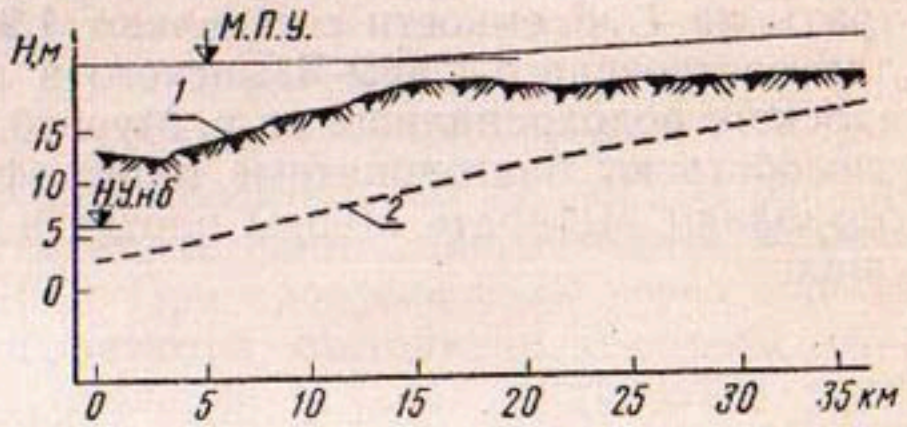


Рис. 47. Продольный профиль Таш-Кепринского водохранилища:

1 — дно 1955 г.; *2* — 1926 г.

Твердый сток р. Мургаб почти полностью формируется притоками Кашан и Кушка, а жидкий сток их очень мал. Из общего годового объема жидкого стока р. Мургаб 1,6 млрд. *м*³ на долю притоков приходится примерно 110—120 млн. *м*³, или 7,0—7,5%, причем сток р. Кашан составляет 3,0—3,5%. По данным гидрологических ежегодников за 1951, 1953, 1954, 1956—1959 гг., среднегодовой расход взвешенных наносов р. Кашан вблизи устья составляет 169,7 *кг/сек*, что дает среднегодовой сток этих наносов в размере 5,3 млн. *т*. При среднегодовом стоке взвешенных наносов р. Мургаб, равном 9,53 млн. *т* [14], сток наносов из р. Кашан составляет 55%. Средняя мутность в этой реке за период 1950—1959 гг. была 94,5 *кг/м*³, а в р. Кушка — 23,10 *кг/м*³. Иногда поток р. Кашан по содержанию наносов приближается к селевому. Например, 11 апреля 1957 г. мутность воды в реке была равна 455 *кг/м*³.

Приведенные данные показывают, что эффективным мероприятием по борьбе с дальнейшим заилением Таш-Кепринского водохранилища и выклиниванием подпора будет задержание твердого стока притоков (в первую очередь р. Кашан) в специальных аккумулирующих водохранилищах. Проектный институт Туркменгипроводхоз в 1962 г. разработал вариант сооружения такого водохранилища. На р. Кашан было найдено

несколько створов для сооружения плотин с наибольшей высотой 25—30 *м* и водохранилищами 120—130 млн. $м^3$. Более подробное определение технико-экономических показателей для одного из створов позволило установить, что при наибольшей высоте земляной плотины 29 *м* и объеме ее тела 1,99 млн. $м^3$ полный объем водохранилища составит 127 млн. $м^3$, площадь зеркала 9,2 $км^2$, полезный объем 22 млн. $м^3$. Это водохранилище будет аккумулировать твердый сток реки в течение 20—25 лет. При стоимости сооружения водохранилища 2,41 млн. руб. затраты на 1 $м^3$ емкости составляют 1,9 коп. против 3,1—2,4 коп. для построенного Сары-Язынского и проектируемого Тахта-Базарского водохранилища на р. Мургаб. Такому снижению затрат способствуют благоприятные топографические условия, которые позволяют выбирать створы плотин в относительно узких каньонах.

Глава IV

Озерные отстойники и расчет их заиления

В последнее время на ряде оросительных систем для осаждения наносов используют местные понижения, которые встречаются на трассе каналов [32]. При пропуске воды через понижения большой емкости образуются отстойники озерного типа. В начальный период эксплуатации в таких отстойниках осаждаются почти все наносы. Примером естественных отстойников являются Келифские озера на трассе Каракумского канала.

Использование озерных отстойников позволяет продолжительное время аккумулировать наносы и избежать больших затрат по очистке. С другой стороны, почти полное осветление потока в таких отстойниках приводит к ряду отрицательных последствий: осветленной водой размывается русло канала, повышаются потери воды на фильтрацию, ниже этих отстойников зарастает русло. В результате заиления озер и образования в них русла поднимается уровень воды на начальном участке озера, что, в свою очередь, создает подпор на канале и заиление последнего.

Для разработки методики расчета заиления отстойников озерного типа, установления сроков их заиления, формирования в них русла проводились исследования заиления озер на трассе Каракумского канала в 1958—1961 гг.

§ 26. Исследование заиления Келифских озер на трассе Каракумского канала

Трасса Каракумского канала на участке 39—105 *км* проходит по шоровым понижениям, образующим Келифский узбой. При заполнении понижений водой образовались восемь озер, связанных между собой сравнительно узким руслом.

На участке от 50 до 70 *км* расположены первые четыре озера: Двадцатка, Зеленое, Лебединое и Туркменское (рис. 48).

К лету 1958 г. их длина была от 3 до 5 *км*, ширина 400—600 *м* и глубина 2,5—3 *м*.

Далее (за 70 *км*) трасса канала проходит по озерам Каргалы, Балтачага, Петели, Часкак. Ширина этих озер 1,5—2 *км*, глубина 5—10 *м*. Ширина русел, соединяющих озера, на трассе до 70 *км* составляет 40—60 *м*, на остальном участке — 100—200 *м*.

В начале исследований (1958 г.) перепад уровня воды от 50 до 61 *км* трассы канала достигал 5,5 *м*, вследствие чего русло

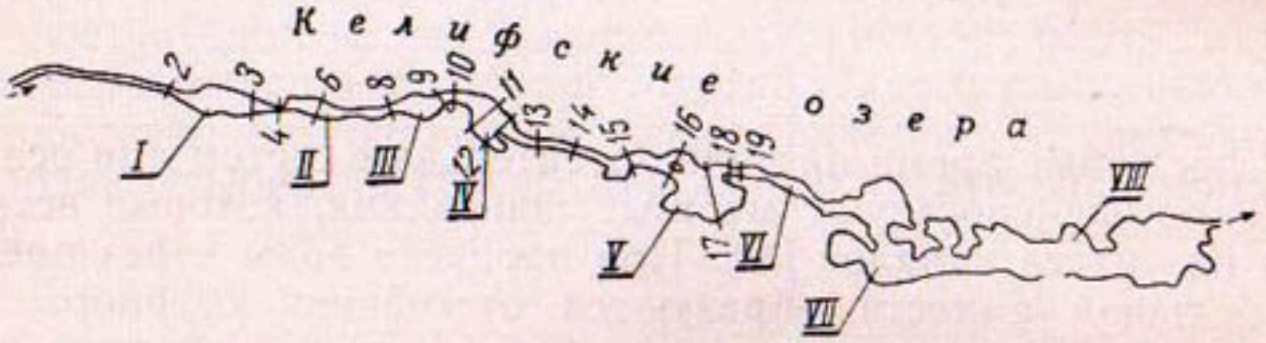


Рис. 48. Схема расположения Келифских озер:

I — оз. Двадцатка; *II* — оз. Зеленое; *III* — оз. Лебединое; *IV* — оз. Туркменское; *V* — оз. Каргалы; *VI* — оз. Балтачага; *VII* — оз. Петели; *VIII* — оз. Часкак; *2—19* — номера створов.

между озерами на этом участке имело большой уклон. В конце 1957 г. русло, сформированное на заилившемся участке озера Двадцатка (47—50 *км*) сбросными водами Бассага-Керкинского канала при расходе 10 *м*³/*сек*, имело ширину по урезу 14—16 *м* и уклон 0,00065. До 1957 г. вода из Бассага-Керкинского канала сбрасывалась в Келифский узбой, разливаясь по озерам; образовалось множество мелководий, поросших камышом. После включения цепи озер в трассу Каракумского канала (1958 г.) уровень воды в озерах поднялся. На мелководных озерах, где глубина не превышала 2,5 *м*, наличие растительности (камыш) существенно повлияло на процесс заиления.

На предозерном участке Каракумского канала был запроектирован перепад, который не был построен. Отсутствие перепадного сооружения вызвало интенсивный размыв ложа канала, а наносы поступили в озера. За период с июня 1958 г. по январь 1962 г. количество таких наносов достигло 7,4 млн. *м*³; в основном это были песчаные фракции с диаметром 0,1—0,25 *мм*.

Полевые исследования проводились в периоды высокой мутности: в 1958 г. (июнь — июль и октябрь), в 1959 г. (с июля по сентябрь), в 1960 г. (июнь — июль), в 1961 г. (май — июнь). Кроме того, использован материал исследований Туркмен-НИИГиМ [5].

На участке от 39 до 80 *км* канала периодически промеряли поперечники по 19 основным и 32 дополнительным створам; отбирали пробы на мутность с определением в характерных местах фракционного состава взвешенных и донных наносов, измеряли

скорости и уклон потока, определяли объемный вес отложений, проводили мензульную съемку отмелей, русл и массива камышей. Сток наносов определяли по измеренным твердым расходам на постах гидрометслужбы (50 и 70 *км*).

Количество донных наносов принимали равным 10% от взвешенных. Объемный вес отложений взвешенных наносов γ подсчитывали по составу наносов по формуле А. Г. Хачатряна [23]:

$$\gamma = 0{,}8 + 0{,}66\,\rho^{0{,}3}, \qquad (246)$$

где ρ — доля наносов крупнее 0,05 *мм*.

Объемный вес отложений донных наносов принят 1,46 *т/м*³.

За период исследований с 1958 по 1961 г. произошло заиление всех малых озер, расположенных на трассе канала до 70 *км*, и узкой части озера Каргалы. На этих озерах сформировалось русло. Объем озер в июне 1958 г. был равен 235,7 млн. *м*³, площадь зеркала 52,7 *км*². К январю 1962 г. свободный объем уменьшился до 211,3 млн. *м*³, а площадь зеркала сократилась до 51,3 *км*² (объемы и площади подсчитаны при уровнях июня 1961 г.). В 1961 г. на заиленном участке озер в период больших расходов (май — сентябрь) площадь мелководий с глубиной 20—40 *см* составляла 15,4 *км*². Большая часть этой площади поросла камышом. За период 1958—1961 гг. в бассейн поступило 24,43 млн. *м*³ наносов, которые почти полностью осели в малых озерах и в озере Каргалы (табл. 45).

ТАБЛИЦА 45

Твердый сток в створе Каракумского канала и в озерах за период исследований (1958—1961 гг.)

Год	Твердый сток в створе 50 *км*, млн. *м*³	Отложения в озерах					
		малых (50—70 *км*)		оз. Каргалы (70—80 *км*)		ниже оз. Каргалы	
		млн. *м*³	% осветления потока	млн. *м*³	% осветления потока	млн. *м*³	% осветления потока
1958	2,53	2,51	99,2	0,02	0,8	—	—
1959	7,07	6,45	91,2	0,58	8,2	0,04	0,6
1960	7,97	4,57	57,3	3,31	41,5	0,09	1,2
1961	6,86	2,76	40,2	3,93	57,3	0,17	2,5
Итого	24,43	16,29	—	7,84	—	0,30	—

В составе наносов малых озер содержалось значительное количество песчаных фракций с $d>0{,}05$ и $d>0{,}1$ *мм* (табл. 46), что является следствием размыва канала выше озер. В наносах, поступающих в озеро Каргалы, содержание песчаных фракций с $d>0{,}05$ *мм* увеличилось по мере заиления вышерасположенных озер, в 1961 г. состав наносов здесь начал приближаться к составу наносов на 50 *км* (табл. 47).

ТАБЛИЦА 46

Фракционный состав взвешенных наносов, поступающих в озера
(створ на 50 *км*)

Дата измерений	Мутность, *кг/м*³	Количество наносов, %, по фракциям, *мм*		
		<0,05	0,05–0,1	>0,1
20/VIII 1959 г.	4,15	75,9	23,0	1,1
4/VIII 1960 г.	3,43	69,7	22,2	8,1
30/VIII 1960 г.	4,17	67,6	26,4	6,0
29/IX 1960 г.	2,00	62,4	21,2	16,4
30/II 1961 г.	2,18	40,5	17,3	42,2
20/III 1961 г.	2,05	54,8	15,3	29,9
20/IV 1961 г.	2,77	71,1	10,1	18,8
21/V 1961 г.	2,97	80,7	8,3	11,0
8/VI 1961 г.	4,44	88,1	5,6	6,3
22/VI 1961 г.	2,10	54,3	36,2	9,5
21/VII 1961 г.	2,46	84,8	8,0	7,2
21/VIII 1961 г.	3,03	75,4	18,3	6,3
20/X 1961 г.	1,47	47,5	23,3	29,2
22/XI 1961 г.	1,60	57,0	17,7	25,3
21/XII 1961 г.	1,38	53,2	17,4	29,4
20/I 1962 г.	1,20	49,4	15,1	35,5
Среднее за 1961 г.	2,26	61,2	15,1	23,7

ТАБЛИЦА 47

Фракционный состав взвешенных наносов перед озером Каргалы
(створ на 70 *км*)

Период, год	Мутность, *кг/м*³	Количество наносов, %, по фракциям, *мм*			
		<0,01	0,01—0,05	0,05—0,10	>0,10
1959	0,23	46,8	45,9	7,1	0,2
1960	1,06	47,1	36,6	11,0	5,3
1961	1,30	35,8	35,6	15,4	13,2

Наблюдениями установлено, что в начале заиления озер образуется конус выноса; обычно по краям его разрабатываются русла. К концу заиления основные русла вытесняют более слабые; поток в них проносит все наносы без осаждения и насыщается теми фракциями наносов, из которых сложено русло.

Стадии образования конуса выноса и формирования русла можно проследить при заилении озера Двадцатка (рис. 49). Заиление оставшейся части озера произошло в 1958 г., в 1959 г. в нем сформировалось русло, которое начиная с лета 1959 г. мало изменялось. План расположения русла в июне 1961 г. отличался от такового в сентябре 1960 г. лишь концевой частью (пунктир на рисунке 49, *в*).

Поток на этом участке в 1959 г. был насыщен наносами с частицами крупнее 0,05 *мм*, а в 1960—1961 гг. — крупнее 0,1 *мм*.

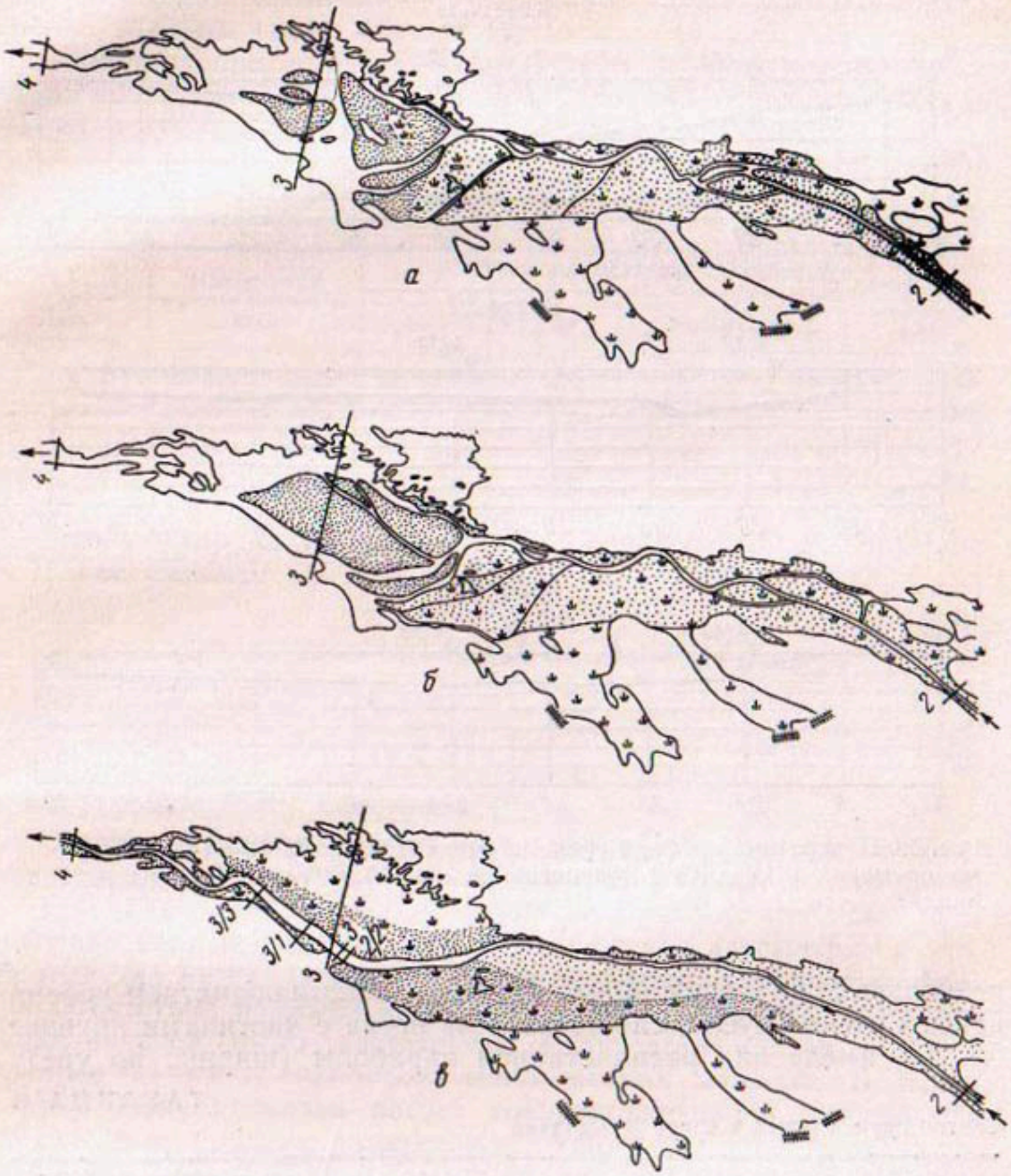


Рис. 49. Динамика заиления озера Двадцатка:

а — июнь 1958 г; *б* — октябрь 1958 г.; *в* — июнь 1961 г.

На рисунке 50 приведены поперечники по трем створам (съемки 1960 и 1961 гг. при одинаковом расходе $Q=143$ *м³/сек*). Сечение русла за этот период почти не изменилось, только

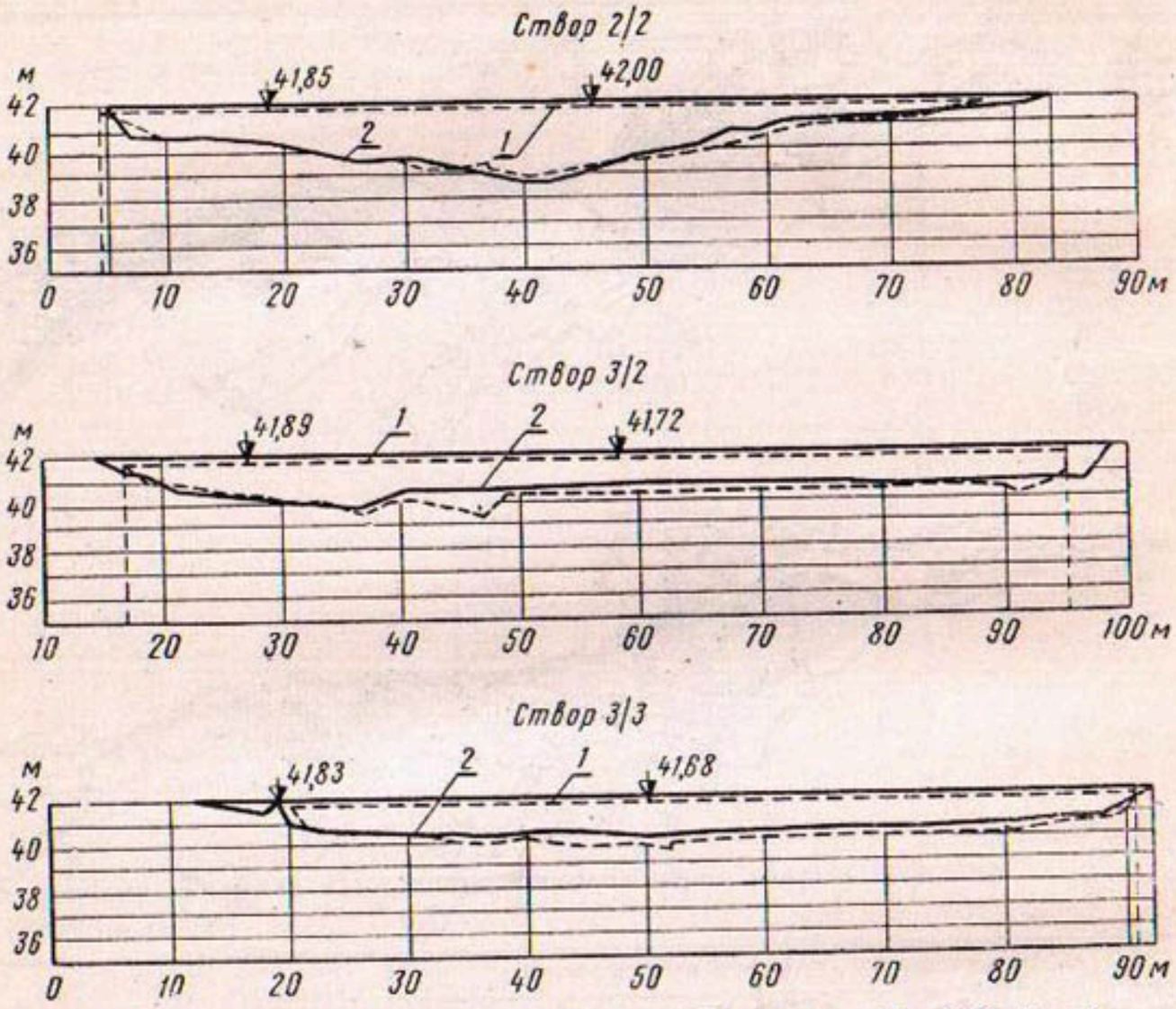


Рис. 50. Поперечные профили русла на озере Двадцатка ($Q=143$ *м³/сек*) по промерам 2/IX 1960 г. (пунктирная линия); 8/VI 1961 г. (сплошная линия).

несколько поднялось дно, что связано с общим поднятием уровня воды. Сечение русла, сложенного из песка с частицами крупнее 0,1 *мм*, имело вид распластанной параболы (ширина по урезу

ТАБЛИЦА 48

Состав грунта русла в озере Двадцатка

Время измерений	Створ	Содержание отдельных фракций, %, *мм*		
		<0,05	0,05—0,10	>0,10
13/VI 1959 г.	3	4,5	22,9	72,6
6/VIII 1960 г.	3/3	2,7	23,7	73,6
	3/3	1,1	26,3	72,6
6/VI 1961 г.	3	0,2	6,8	93,0
	3/1	0,2	4,1	95,7
	3/3	0,8	19,2	80,0

воды $B=76$ *м*, средняя глубина $H=1{,}54$ *м*, уклон $i=0{,}000245$, скорость потока $v=1{,}22$ *м/сек*).

В процессе заиления и формирования русла в составе донных отложений увеличилось содержание более крупных фракций с $d>0{,}1$ *мм* (табл. 48).

Сопоставление измеренной мутности и транспортирующей способности потока (табл. 49) показало, что поток не был насыщен до его полной транспортирующей способности.

ТАБЛИЦА 49

Измеренная мутность и общая транспортирующая способность потока в русле озера Двадцатка

Дата измерений	Измеренная в русле мутность, *кг/м³*		Транспортирующая способность				
			по Гостунскому		по Замарину		по Хачатряну
	начало	конец	$\overline{w}_0$, *мм/сек*	$\rho_т$, *кг/м³*	$\overline{w}_0$, *мм/сек*	$\rho_т$, *кг/м³*	$\rho_т$, *кг/м³*
6/VIII 1960 г.	3,14	3,14	1,30	4,80	1,44	9,46	9,71
9/VI 1961 г.	4,33	4,27	0,95	7,46	1,20	13,42	8,44

Транспортирующую способность определяли по формуле А. Н. Гостунского:

$$\rho_т = \Gamma \frac{H^{0,5} i^{0,5}}{\overline{w}_0}, \tag{247}$$

по формуле Е. А. Замарина:

$$\rho_т = 11v \sqrt{\frac{\overline{Riv}}{\overline{w}_0}} \tag{248}$$

и по формуле А. Г. Хачатряна (9).

Среднюю гидравлическую крупность $\overline{w}_0$ определяли по соответствующим формулам Гостунского и Замарина.

Как видно из таблицы 49, поток в русле может проносить значительно больше наносов, чем было в натуре. Несмотря на это, размыв дна не наблюдался и русло сохраняло устойчивую форму. Отсутствие размыва здесь можно объяснить тем, что в составе наносов было достаточное количество частиц наносов крупнее 0,1 *мм* и, наоборот, мало мелких наносов. В связи с этим ниже проведен расчет транспортирующей способности потока не по средним данным, а по отдельным фракциям. Такое сравнение возможно провести, пользуясь зависимостями А. Г. Хачатряна [23].

$$\rho_{тi} = c_т \left(\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{u_в} \right), \tag{249}$$

где $\rho_{тi}$ — количество наносов фракции с гидравлическими крупностями w_i и w_{i+1};

$u_в$ — взвешивающая скорость потока;

$c_т$ — постоянная кривой распределения.

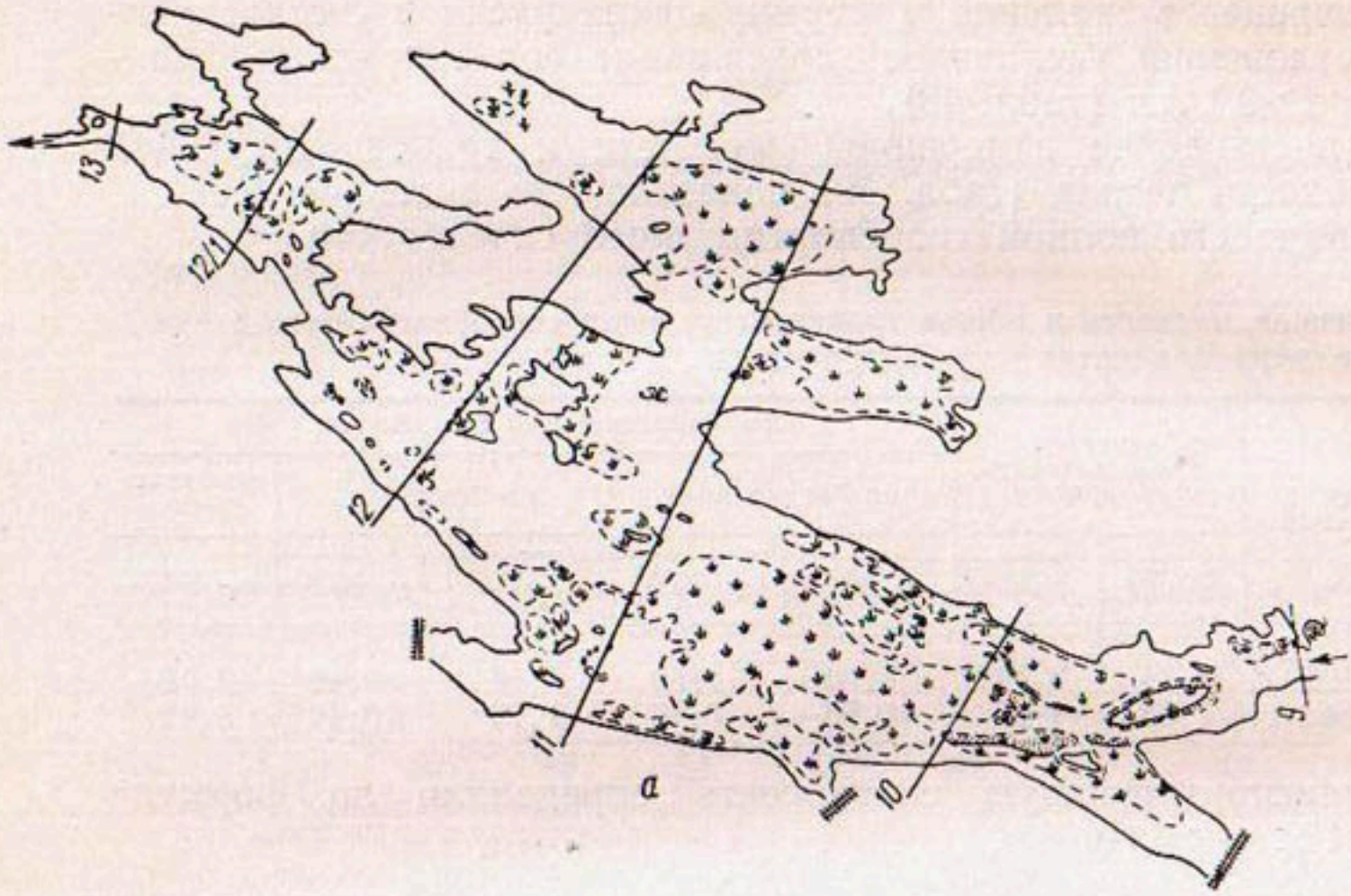
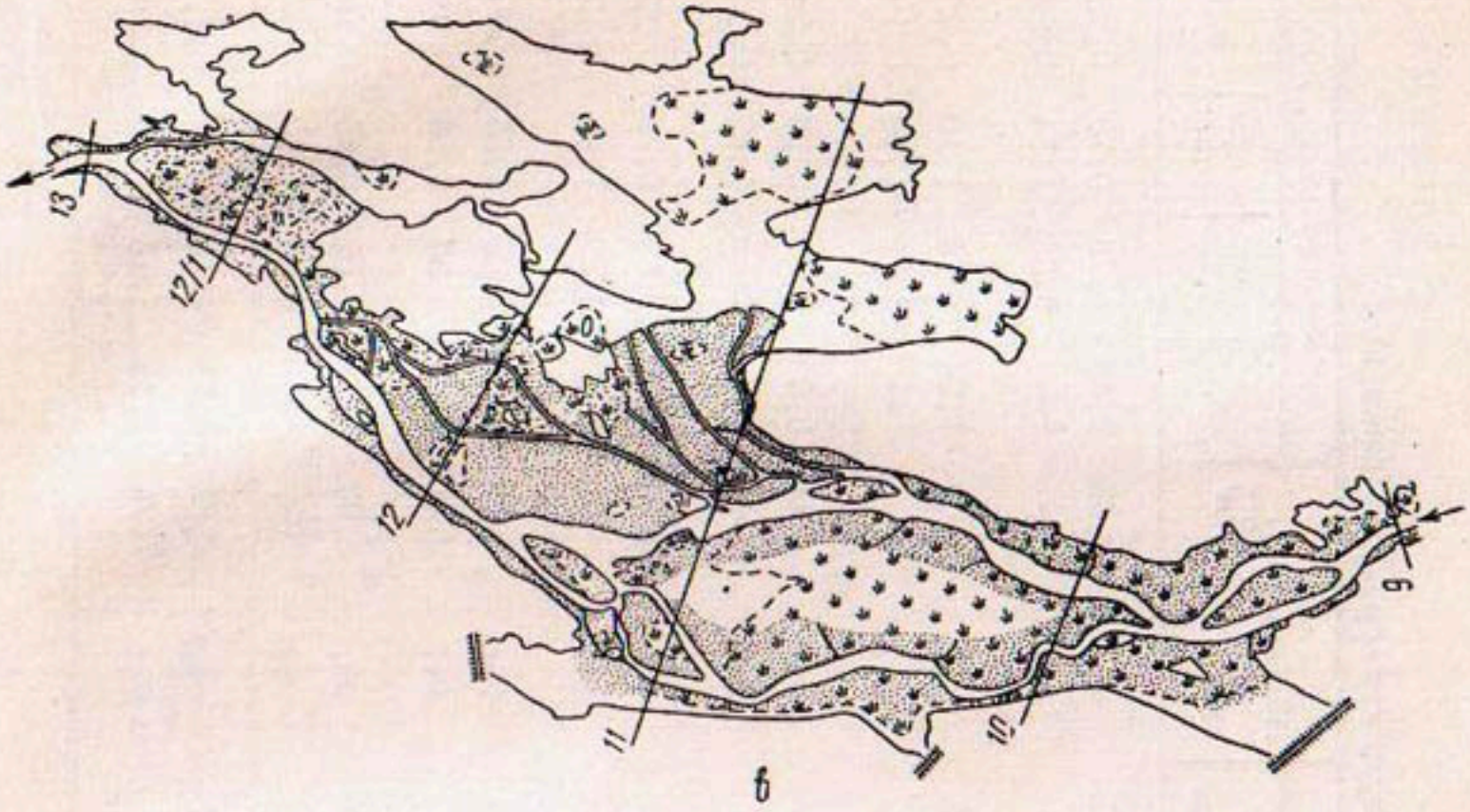


Рис. 51. Динамика заиления озера Туркменское:
а — июнь 1959 г.; *б* — август 1959 г.



б

Рис. 51 (продолжение):
в — июнь 1961 г.

В таблице 50 приведены транспортирующая способность потока ρ_{Ti} и измеренная мутность ρ_{oi} в сравнении по участкам: непосредственно перед руслом озера Двадцатка, в русле озера Двадцатка и в свежесформированном русле между озерами Туркменское и Каргалы. Из данных таблицы видно, что поток не насыщен мелкими фракциями, но полностью насыщен крупными фракциями, из которых сложено русло: для озера Двадцатка частицы с $d>0{,}1$ *мм*, для остальных озер — частицы с $d>0{,}05$ *мм*.

Влияние зарослей камыша на процесс заиления изучали на озере Туркменское (1959—1960 гг.). На этом озере до начала заиления в зарослях камыша были протоки (рис. 51, *а*), в которых вода двигалась с большой скоростью. Затем по краям камышового массива образовались отмели (рис. 51, *б*), которые преграждали путь потоку в глубь зарослей. Это ускорило заиление остальных частей озера, но и затянуло срок его полного заиления.

Несмотря на то что уже к лету 1960 г. на всем протяжении озера образовалось русло (рис. 51, *в*), в весенне-летний период 1961 г. здесь откладывалось 35% твердого стока, поступавшего в озеро. Заиление других оставшихся емкостей озера происходило путем полного осветления попадавшей туда воды. Из камышей поток выходил полностью осветленный, он создавал подпор правому руслу и тем способствовал образованию извилистого и более узкого левого русла (рис. 51, *в*), которое сохранилось до конца исследований (1961 г.).

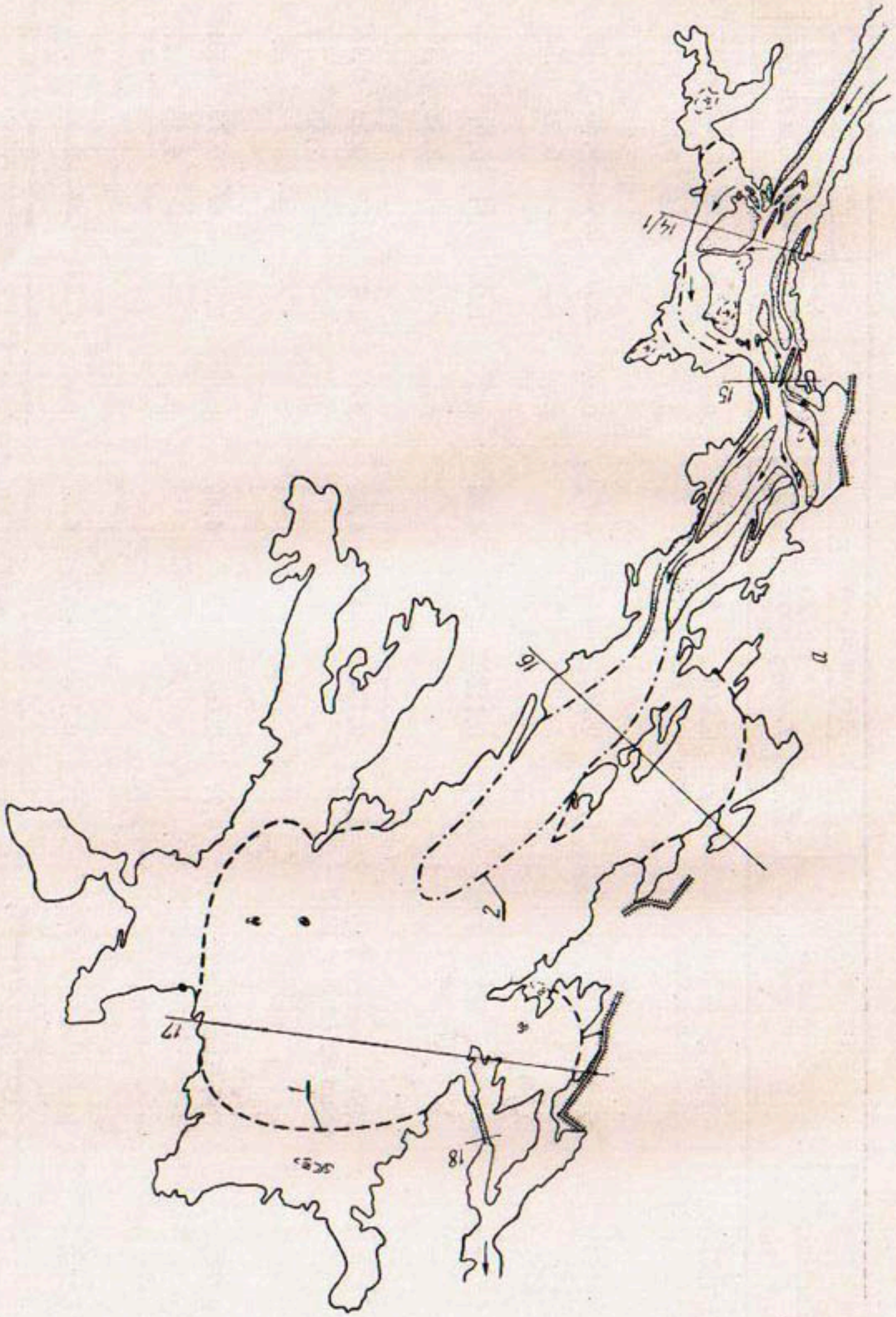
ТАБЛИЦА 50

Сравнение транспортирующей способности потока (ρ_{Ti}) и измеренной мутности (ρ_{oi}) по фракциям

Время наблюдения	Участок, км	Данные потока				Наименование мутности	ρ_o, кг/м³	кг/м³ по фракциям, мм			
		v, м/сек	i, ‰	температура воды, град	$u_в$, мм/сек			<0,01	0,01—0,05	0,05—0,10	>0,10
4/VIII 1960 г.	Приозерный (49—51 км)	1,45	0,250	+23	11,5	ρ_{oi}	3,43	0,66	1,73	0,76	0,28
						ρ_{Ti}	—	—	6,98	1,54	0,23
30/VIII 1960 г.	49—51	1,32	0,320	+23	11,1	ρ_{oi}	4,17	1,04	1,78	1,10	0,25
						ρ_{Ti}	—	—	6.78	1,45	0,19
8/VI 1961 г.	49—52	1,44	0,280	+21	11,7	ρ_{oi}	4,44	0,89	3,02	0,25	0,28
						ρ_{Ti}	—	—	7,10	1,62	0,29
22/VI 1961 г.	49—52	1,43	0,257	+25	11,4	ρ_{oi}	2,10	0,25	0,89	0,76	0,20
						ρ_{Ti}	—	—	6,85	1,49	0,18
6/VIII 1960 г.	Русло на озере Двадцатка	1,17	0,224	+24	8,9	ρ_{oi}	3,10	1,01	1,35	0.65	0,09
						ρ_{Ti}	9,71	3,37	5,32	0,98	0,04
30/VIII 1960 г.	То же	1,24	0,230	+23	9,5	ρ_{oi}	3,03	1,00	1,02	0,85	0,16
						ρ_{Ti}	—	—	5,65	1,10	0,07
8/VI 1961 г.	» »	1,20	0,245	+21	9,4	ρ_{oi}	4,00	0,72	2,89	0,22	0,17
						ρ_{Ti}	7,76	1,45	5,16	1,05	0,10

Продолжение

Время наблюдения	Участок, км	Данные потока				Наименование мутности	ρ_o, кг/м³	кг/м³ по фракциям, мм			
		v, м/сек	i, ‰	температура, град	$u_в$, мм/сек			<0,01	0,01—0,05	0,05—0,10	>0,10
9/VI 1961 г.	Русло на озере Двадцатка	1,20	0,245	+20	9,4	ρ_{oi}	4,35	0,78	3,18	0,17	0,22
						ρ_{ti}	8,43	1,58	5,61	1,14	0,10
22/VI 1961 г.	То же	1,15	0,242	+25	8,8	ρ_{oi}	2,10	0,40	0,88	0,68	0,14
						ρ_{ti}	—	—	5,20	0,93	0,03
18/V 1961 г.	Участок поста ГМС (70 км)	0,72	0,115	+26	4,60	ρ_{oi}	1,96	0,51	0,91	0,50	0,04
						ρ_{ti}	—	—	3,42	0,13	0,00
5/VI 1961 г.	Конец озера Туркменское (створ 12/1—13)	0,71	0,134	+27	4,62	ρ_{oi}	0,87	0,33	0,32	0,15	0,07
						ρ_{ti}	—	—	2,48	0,12	0,00
12/VI 1961 г.	Оз. Каргалы (створ 13—14)	0,77	0,084	+20	4,48	ρ_{oi}	1,81	0,67	0,75	0,31	0,08
						ρ_{ti}	—	—	2,16	0,17	0,00
22/VI 1961 г.	Конец озера Туркменское (створ 12/1—13)	0,71	0,134	+27	4,62	ρ_{oi}	1,20	0,34	0,33	0,48	0,05
						ρ_{ti}	—	—	2,48	0,12	0,00


14/1
15
16
17
18

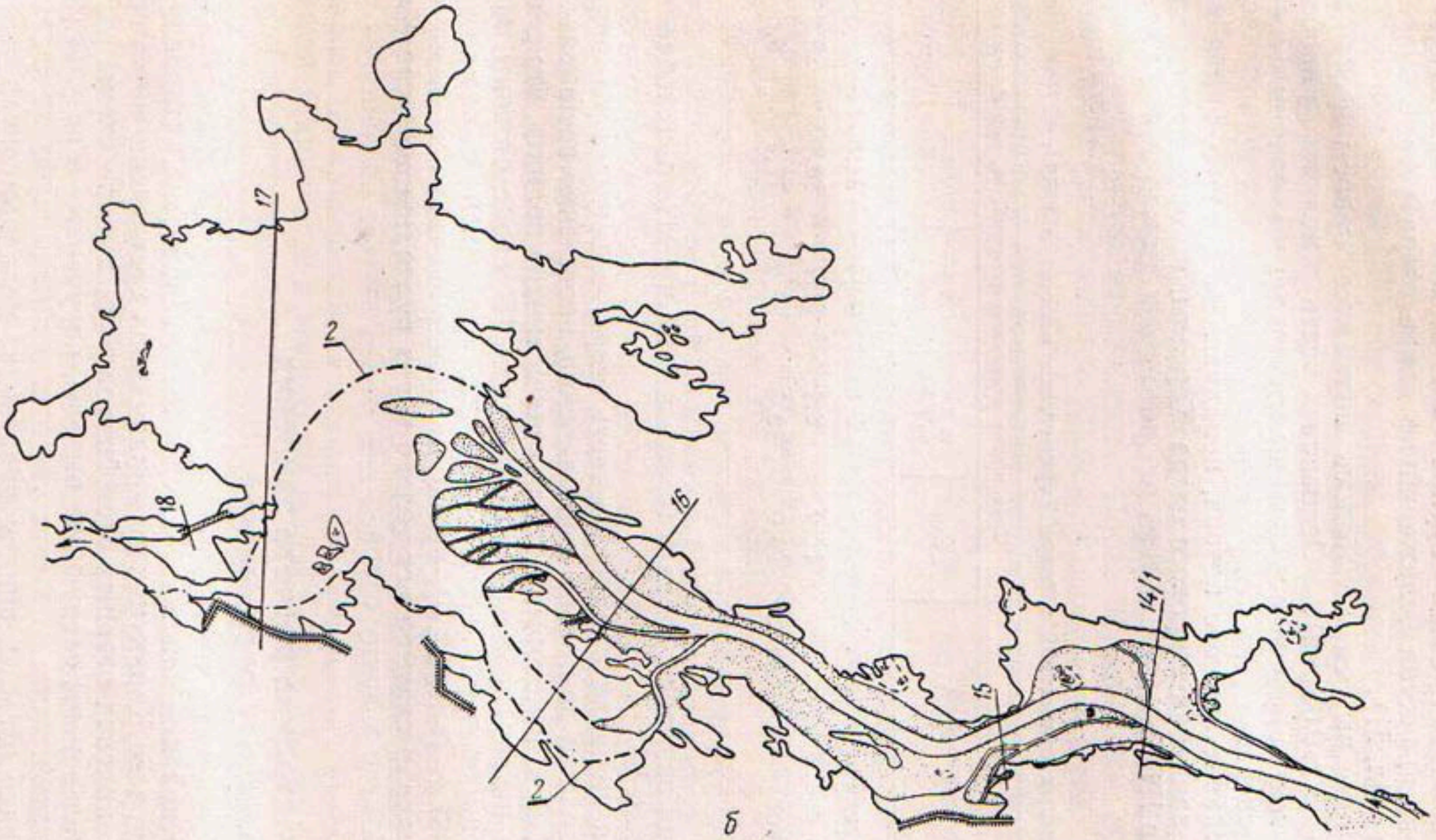


Рис. 52. Динамика заиления озера Каргалы:

а — июнь 1961 г.; *б* — май 1962 г.; *1* — граница чистой воды; *2* — граница мутности $\rho = 0{,}1$ *гр/л*.

При заилении озера Туркменское в 1959 г. был измерен фракционный состав отложений по длине озера в зоне конуса выноса (табл. 51).

В конусе выноса отлагались почти все наносы песчаных фракций ($d>0{,}05$ *мм*). Основная часть мелких наносов ($d<0{,}015$ *мм*) проносилась дальше и осаждалась тонким слоем в конце озера.

Растекание мутного потока, попадающего в озеро, видно на примере заиления широкого озера Каргалы, которое начало заиляться в 1960 г.

ТАБЛИЦА 51

Состав донных отложений в озере Туркменское в августе 1959 г.

Место взятия проб	Содержание отдельных фракций, %, при d, *мм*				
	<0,01	0,01—0,015	0,015—0,03	0,03—0,05	>0,05
Начало озера	6,9	5,8	29,4	34,3	23,6
Середина озера	12,0	8,1	31,7	28,0	20,2
В конце конуса выноса .	26,0	13,5	37,2	17,7	5,6

Стадии заиления озера Каргалы в 1961 и 1962 гг. приведены на рисунке 52.

Поток, попадая в широкую часть озера, под действием инерции продолжал двигаться прямолинейно, постепенно расширяясь (рис. 52, *а*). С некоторым приближением можно принять, что расширение потока происходило под углом 15° в обе стороны. По рекогносцировочной зарисовке русла, сделанной с самолета в мае 1962 г. (рис. 52, *б*), видно, что влияние отвода на поворот потока начало сказываться только когда русло подошло сравнительно близко к концу озера.

§ 27. Методика расчета заиления озерных отстойников

На основании анализа материалов исследований заиления озер на трассе Каракумского канала была составлена методика расчета заиления озерных отстойников. Для выбора схемы расчета использованы следующие выводы, полученные в результате исследований.

Заиление озерных впадин происходит неравномерно и зависит как от гидравлических параметров русла, мутности потока и гранулометрического состава грунта русла и наносов, так и от

зарастания их камышом и другой растительностью, а также от первоначальной конфигурации озерного понижения.

Поток воды, поступая в озеро, постепенно расширяется примерно под углом 15° в обе стороны, движется прямолинейно в направлении, полученном перед входом в озеро. Поворот потока в сторону выхода из озера происходит только вблизи этого выхода. На начальном участке озера выпадает основная масса наносов, образуя конус выноса, по краям которого в дальнейшем разрабатываются русла.

Если на пути потока отсутствуют препятствия и перед входом в озеро нет резких поворотов, то сформированное русло будет иметь небольшую извилистость. После образования русла на всем протяжении озера остаются отдельные емкости, которые заиляются в период высоких вод. Количество наносов, заиляющих оставшиеся емкости, можно принять равным 10% твердого стока, поступающего в озеро в период высоких вод. Если эти емкости расположены в зарослях камышей на пути потока, этот процент увеличивается до 30%.

Элементы сформированного русла в заилившемся озере зависят от состава и количества донных и взвешенных наносов в русле выше выклинивания кривой подпора. В процессе формирования русла крупность наносов все время увеличивается. Русло в озере формируется за три периода.

В первый период русло образуется в отложениях конуса выноса в соответствии с его составом и наносным режимом потока.

Во второй период прежнее русло переформировывается в результате осаждения в нем наносов, которые ранее отлагались выше озера. Это происходит в соответствии с наносным режимом потока и составом донных отложений в зоне кривой подпора выше озера. Третий период наступает после полного заиления всей цепи озер, образования в них русла и соответствующего переформирования канала на участке выше озер.

Русло становится сравнительно устойчивым, когда оно проносит все поступающие в него наносы без осаждения. Поток, проходящий по такому руслу, должен быть насыщен частицами наносов тех крупностей, из которых сформировалось русло. С изменением крупности и количества поступающих в русло наносов оно переформировывается.

В первый период русло не может быть устойчивым, потому что крупность поступающих наносов все время меняется.

Во второй период состав поступающих наносов изменяется незначительно, и можно считать, что в этот период русло довольно устойчиво. В конце третьего периода русло окончательно сформируется и станет устойчивым; этот период наступает через продолжительное время, и поэтому зачастую наибольший практический интерес представляет относительно устойчивое русло второго периода формирования.

Транспортирующая способность потока, определяемая с использованием величины средней гидравлической крупности взвешенных наносов, не всегда отражает действительную картину заиления. Она может дать неправильные представления об устойчивости сформированного русла, особенно если выше рассматриваемого участка происходит размыв. Поэтому следует более детально проанализировать ход заиления по периодам и отдельным фракциям с учетом возможности зарастания.

Если неглубокое понижение до заполнения его водой заросло камышом или другой густой растительностью, то заиление будет происходить по схеме заиления озера Туркменское. При расчете определяют время заиления, изменение кривой подпора и размеры русла, образовавшегося на озерах.

В основу расчета приняты следующие положения, обоснованные проведенными исследованиями.

1. Кривую подпора можно разделить на две части — начальный участок с заметным уклоном и участок с практически горизонтальной свободной поверхностью. Первый участок будем называть русловым, а второй — озерным.

2. С повышением уровня воды в озере соответственно изменяется высотное положение сформированного русла с постоянным поперечным сечением (как на озере Двадцатка в 1960—1961 гг.).

3. Расчет динамики осаждения наносов и определение транспортирующей способности потока проводится по методу ВНИИГиМ [23], как в отстойнике с переменной глубиной.

4. Заиление основного объема, ограниченного зоной растекания потока, рассчитывается по изложенной методике. В первом приближении растекание потока принимают под углом 15° в обе стороны.

Заиление оставшихся объемов рассчитывают с учетом, что в них откладывается примерно 10% стока наносов, поступающих в озеро в период высоких горизонтов. Такой расчет обычно приходится выполнять при широких озерах, когда

$$B \geqslant 0{,}5\,L + B_р\ м, \qquad (250)$$

где B — наибольшая ширина озера;

L — его длина;

$B_р$ — ширина русла по урезу при прохождении паводка.

Схема расчета приведена на рисунке 53. Перед расчетом строится кривая подпора на момент начала заиления и выделяется русловая часть (участок 1 на рис. 53). Оставшуюся озерную часть отстойника разбивают на участки с примерно одинаковыми гидравлическими характеристиками.

Для каждого выбранного участка вычисляют: средние значения удельных расходов, площади живого сечения, скорости, уклона и глубины. Строится график изменения ширины по урезу и площади сечения при различных горизонтах в пределах изме-

нения кривой подпора. Подобный график строят и для участка выше выклинивания кривой подпора.

По объему заиления первого (руслового) участка выбирают период расчета. Сток наносов за первый период должен быть меньше объема заиления первого участка.

Для выбранных расчетных расходов определяют характеристику твердого и жидкого стока (расход воды, мутность, характеристика взвешенных наносов). Для упрощения расчета заиления донные наносы, имеющиеся в потоке выше кривой подпора, не принимают во внимание. Эти наносы обычно выпадают в самом начале кривой подпора и не оказывают большого влияния на характер формирования русла во второй стадии.

По средним гидравлическим данным первого (руслового) участка вычисляют взвешивающую скорость потока $u_в$ по формуле (10), предельную гидравлическую крупность избыточных наносов w_x по формуле (12) и предельную гидравлическую крупность осевших наносов в конце участка w_{Hl} (25).

По этим данным определяют расчетную взвешивающую скорость потока и вычисляют параметры русла. Методика определения характеристики взвешенных наносов и расчет русла приведены ниже после описания расчета динамики заиления.

Предельный объем заиления расчетного участка, необходимый для образования русла, равен:

$$V_{зi} = V_i - V_р, \tag{251}$$

где V_i — объем участка после образования русла, для 1-го участка $i=1$;

$V_р$ — объем русла на этом участке.

В первом приближении этот объем определяется на первом участке (рис. 53) без учета добавочного подпора от заиления нижерасположенных участков озера. Подпор в конце первого участка определяют по формуле:

$$H_1 - H_0 = L_1 (i_0 - i_р), \tag{252}$$

где L_1 — длина первого участка;

i_0 — уклон свободной поверхности воды в русле без подпора;

$i_р$ — то же, для сформированного русла.

При последующих расчетах заиления руслового участка длина его все время увеличивается (за счет изменения места выклинивания подпора). Эту длину (на рис. 53 обозначена буквой a) можно определить по формуле (252) с учетом повышения горизонта воды из-за заиления нижерасположенных участков. Переходной участок, по которому вычисляют параметры русла, в первом приближении принимают равным первому участку. После образования на нем русла переходным будет участок кривой под-

пора от этого русла (на рис. 53 обозначен буквой *в*). Далее произведен расчет заиления по участкам по методу, принятому для отстойников с переменной глубиной [23]. При этом началом отстойника считают место выклинивания подпора. Удельный расход принимают средним на участке осаждения наносов избыточной мутности от начала ее образования до рассматриваемого створа.

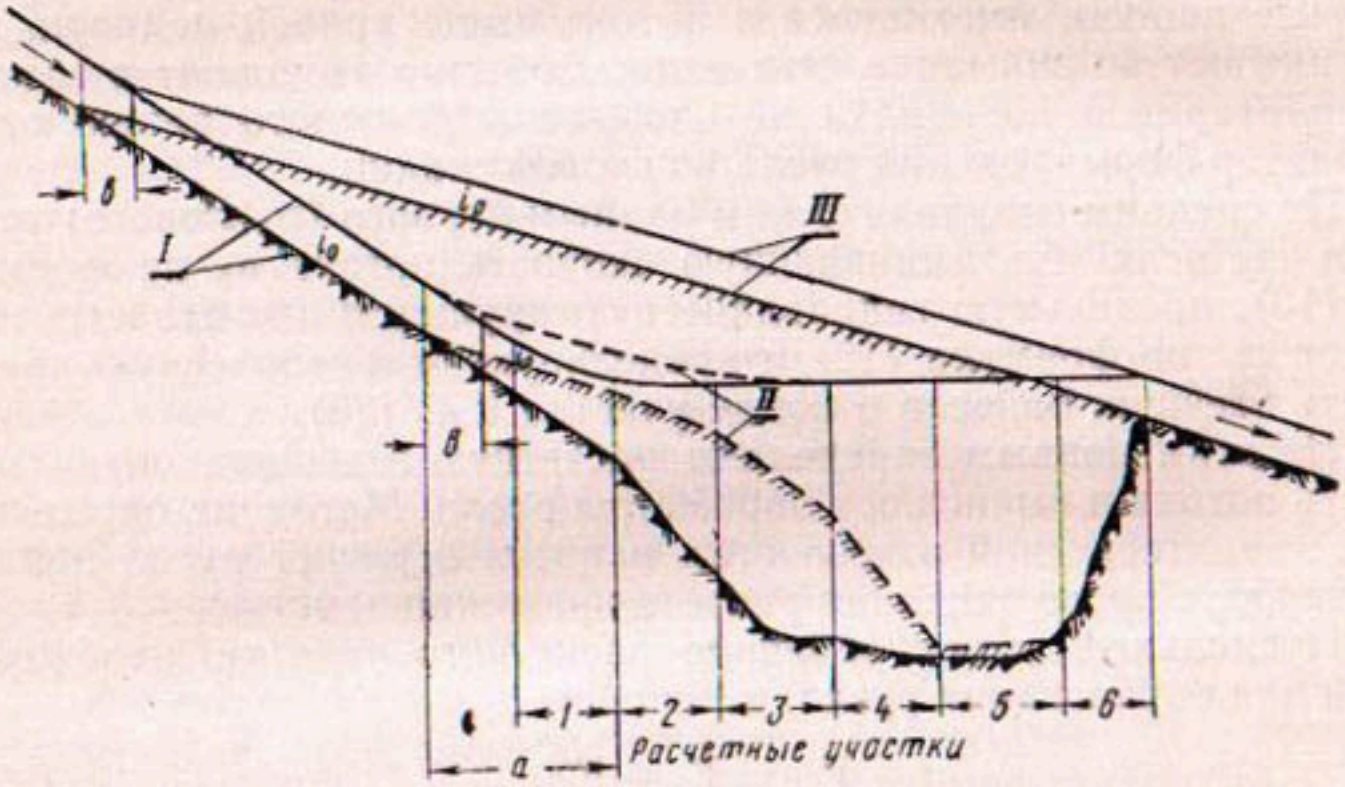


Рис. 53. Расчетная схема заиления отстойника озерного типа.
Линии дна и уровня воды:

I — до заиления; *II* — после формирования русла на начальном участке; *III* — после заиления.

С известным приближением расчет осаждения наносов в подобных отстойниках можно вести по осредненным на всей длине гидравлическим элементом. Этот метод изложен в § 4 нашей книги.

Для расчета отстойник разбивают на короткие участки, мутность в конце каждого участка определяют по средним от начала до расчетного створа по одной из формул (35а—в) в зависимости от расчетной области.

При делении отстойника на S участков мутность в конце каждого участка соответствует $\rho_{в1}$, $\rho_{в2} \dots$, $\rho_{в_{S-1}}$, $\rho_{в_S}$, а количество осевших наносов в отстойнике $\rho_з$ на первом участке $\rho_{з_1} = \rho_0 - \rho_{в_1}$ на втором участке $\rho_{з_2} = \rho_{в_1} - \rho_{в_2}$ и т. д. Отсюда количество наносов, осевших на i участке отстойника, составляет:

$$\rho_{з_i} = \rho_{в_{i-1}} - \rho_{в_i} \ кг/м^3, \qquad (253)$$

а на последнем участке:

$$\rho_{з_S} = \rho_{в_{S-1}} - \rho_{в_S}. \tag{253а}$$

Полное же количество осевших в отстойнике наносов будет:

$$\rho_з = \sum_{i=1}^{i=S} \rho_{з_i} = \rho_0 - \rho_{в_S}. \tag{253б}$$

После вычисления мутности в конце каждого участка вычисляют объем отложений на каждом участке за расчетный период:

$$V_{отл} = \frac{\left(\rho_{в_i} - \rho_{в_{i-1}}\right) \cdot Q \cdot 86{,}4\,T}{\gamma}, \tag{254}$$

где $\rho_{в_i} - \rho_{в_{i-1}}$ — величина уменьшения мутности на участке i;

Q — расход воды, $м^3/сек$;

T — расчетный период в днях;

γ — объемный вес отложений.

Объем отложений на первом участке сравнивают с объемом отложений, необходимым для образования русла. Если значение по формуле (251) получается больше, то для дальнейшего расчета определяют среднюю площадь отложений:

$$\omega_{отл_i} = \frac{V_{отл_i}}{L_i} \tag{255}$$

и толщину отложений:

$$z_{отл_i} = \frac{\omega_{отл_i}}{B_i}. \tag{256}$$

Затем строят новую кривую подпора и расчет осаждения наносов повторяют.

Если же $V_{отл} \geqslant V_{зI}$, значит, на рассматриваемом участке уже образовалось русло. В этом случае расчетный период T уменьшается до

$$T_1 = \frac{\gamma \cdot V_з}{86{,}4Q\,(\rho_0 - \rho_1)} \tag{257}$$

и объем отложений на всех последующих участках определяют для времени T_1. Затем вычисляют $\omega_{отл_i}$ и $z_{отл_i}$ и по этим данным строят новую кривую подпора.

При построении кривой подпора уклон на первом участке принимают равным уклону сформированного русла. По средним гидравлическим элементам нового переходного участка *в* (рис. 53) вычисляют $u_в$, w_x и w_H, а также взвешивающую скорость русла и его параметры. По формуле (251) определяют объем заиления, необходимый для образования русла на уча-

стках от нового места выклинивания подпора до конца первого участка $V_{з_1}$ и на втором участке $V_{з_2}$.

Далее, считая, что выше рассматриваемого участка наносы не отлагаются, начиная со второго участка, рассчитывают осаждение наносов. После вычисления мутности в конце второго участка определяют объем отложений до конца второго участка $V_{1,2}$ по формуле (254).

Приведенный выше расчет заиления рассматриваемого (второго) участка сделан без учета наносов, которые осаждались на первом участке в расчетный период. Полное же количество наносов, отложившихся на втором участке, равно:

$$V_{отл_2} = V_{отл_1} + V_{отл_{1,2}} - V_{з_a}, \qquad (258)$$

где $V_{отл_1}$ и $V_{отл_{1,2}}$ — объемы отложившихся наносов, вычисленные по формуле (254);

$V_{з_a}$ — объем заиления, необходимый для того, чтобы на участке a от места выклинивания кривой подпора до конца первого участка образовалось русло.

Получившуюся по формуле (258) разность $V_{отл_2}$ сравнивают с объемом заиления $V_{з_2}$, при котором на втором участке должно образоваться русло. При $V_{отл_2} < V_{з_2}$ определяют объем отложений для всех остальных участков, вычисляют среднюю площадь $\omega_{отл}$ и толщину $z_{отл}$ (255, 256); строят новую кривую подпора, вычисляют необходимые объемы заиления, при которых произойдет образование русла на протяжении от начала кривой подпора до конца первого участка и на втором участке. После этого повторяют расчет осаждения наносов, начиная со второго участка.

Если же $V_{отл_2} \geqslant V_{з2}$, уточняют время расчетного периода, как это делалось для первого участка, вычисляют среднюю площадь и толщину отложений для всех последующих участков заиления, строят новую кривую подпора и дальнейший расчет осаждения наносов начинают с третьего участка. Расчет заиления обычно кончают, после того как объем отложившихся наносов достигнет предельного объема заиления озера при отметках воды в сформированном русле. В таком случае все взвешенные и часть донных наносов будут проходить через озеро, не осаждаясь, и оно перестает выполнять функции отстойника или водохранилища.

Размеры устойчивого русла определяют методом последовательного приближения после определения наименьшей гидравлической крупности формирующих русло наносов $w_ф$ и взвешивающей скорости $u_в$ русла. Для получения этих величин проводят расчет осаждения наносов на русловом участке кривой подпора. Расчет параметров русла делают вначале для участков l и a

(рис. 53), а затем для вновь образованного участка кривой подпора выше сформированного русла. Этот участок *в* является переходным от первоначального русла к вновь сформированному.

Для осредненных гидравлических элементов потока определяют наименьшую гидравлическую крупность избытка наносов w_x по формуле (12) и наименьшую гидравлическую крупность донных наносов в конце участка w_H по формуле (25).

При $w_x \geqslant w_H$ значение наименьшей гидравлической крупности формирующих русло наносов $w_ф = w_x$. При $w_x < w_H$ значение $w_ф$ находится в интервале между w_H и w_x.

Если между наименьшей гидравлической крупностью руслоформирующих наносов и избытком наносов на переходном участке существует равенство ($w_ф = w_x$), поток в сформированном русле будет иметь взвешивающую скорость $u_в$, равную средней взвешивающей скорости переходного участка.

При $w_x < w_ф < w_H$ взвешивающая скорость потока для сформированного русла должна быть больше, чем для переходного участка. Если пренебречь изменением количества донных наносов, то значение $u_в$ можно определить подбором из условий равенства между количеством взвешенных наносов в конце переходного участка с частицами крупнее w_x ($\rho_{в>w_x}$) и транспортирующей способностью потока для этих частиц в сформированном русле. С учетом этого условия можно написать:

$$\rho_{в>w_x} = 200\, u_в \left(\ln \frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в} \right), \qquad (259)$$

где $u_в$ — искомая взвешивающая скорость сформированного русла, а

w_x — определяется для переходного участка *в*.

Скорость потока сформированного русла v и уклон i в зависимости от взвешивающей скорости $u_в$, расхода Q и коэффициента шероховатости n можно определить из совместного решения следующих уравнений:

$$v = \frac{1}{n} H^{2/3} i^{1/2}; \qquad (260)$$

$$v = \frac{Q}{BH}; \qquad (261)$$

$$u_в = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\, i^{1/4}; \qquad (10)$$

$$B = A \frac{\sqrt{Q}}{i^k}. \qquad (262)$$

Для определения ширины русла B, сформировавшегося на озерах Каракумского канала наиболее подходящим оказались две формулы, полученные на основе анализа натурных данных для рек и устойчивых каналов Средней Азии:

формула, предложенная С. Т. Алтуниным [4],

$$B = 1{,}3\frac{\sqrt{Q}}{i^{0,2}}; \tag{262а}$$

формула, предложенная Х. Ш. Шапиро,

$$B = 0{,}1\sqrt{\frac{Q}{i}}. \tag{262б}$$

В обеих формулах величина постоянного коэффициента A определена эмпирически путем анализа параметров устойчивых русл рек, но вторая формула более удобна для наших расчетов.

В результате преобразований получено уравнение для определения скорости:

$$v^{0,5}(v - 0{,}05) = \frac{1}{a} u_в \cdot Q^{0,1}, \tag{263}$$

где $a = 0{,}065\ A^{0,2}\ n^{0,3}$, n — коэффициент шероховатости по Маннингу. По данным Х. Ш. Шапиро (см. главу III), для $Q = 100$—300 *м³/сек* $A = 0{,}1$, а для $Q = 1000$ *м³/сек* $A = 0{,}16$.

При определении B по формуле С. Т. Алтунина получается:

$$v^{0,66}(v - 0{,}05) = \frac{1}{a} u_в Q^{0,132}; \tag{263а}$$

$$a = 0{,}065\ A^{0,233}\ n^{0,395}.$$

Из формулы (10) получаем уклон:

$$i = \left[\frac{u_в}{0{,}065\,(v - 0{,}05)}\right]^4. \tag{264}$$

Как было выявлено при исследованиях, очертание русла можно принять по кубической параболе:

$$\left(\frac{B}{2}\right)^3 = \alpha H_{max}. \tag{265}$$

Для расчета осаждения наносов на переходном участке необходимо знать состав и количество наносов выше этого участка. Эти сведения можно получить на ближайшем гидропосте. По составу наносов необходимо определить предельную гидравлическую крупность w_{n+1} и w_1 и постоянную кривой распределения наносов c_0 по формулам (26, 27, 7).

Если данных о наносном режиме потока непосредственно перед зоной выклинивания подпора нет, то значение w_1, w_{n+1} и c_0 определяют по составу и количеству наносов, замеренных на

ближайшем (вышерасположенном) посту с учетом изменения режима наносов по пути движения.

Количество донных наносов выше кривой подпора вычисляют по формулам (128а, 134а, 135), в пределах от наибольшей гидравлической крупности донных наносов до гидравлической крупности w_x.

Расчетный расход, состав и количество наносов, температуру воды принимают по средневзвешенным данным для расчетного периода:

$$Q_{ср} = \frac{\Sigma Q_i \rho_{в_i}}{\Sigma \rho_{в_i}}; \tag{266}$$

$$\rho_{в_{ср}} = \frac{\Sigma Q_i \rho_{в_i}}{\Sigma Q_i}. \tag{267}$$

§ 28. Принятые обозначения

Для облегчения чтения книги ниже приведены наиболее часто употребляемые обозначения.

ρ_0 — мутность потока в источнике орошения (начальная мутность потока). При закономерном распределении по крупности частиц наносов, согласно $j_0 = c_0\left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}}\right)\frac{кг/м^3}{м/сек}$, значение

$$\rho_0 = c_0\left(\ln\frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1}-w_1}{w_{n+1}}\right) кг/м^3.$$

$\rho_т$ — транспортирующая способность потока. Транспортирующей способностью называется наибольшее (предельное) количество наносов, которое поток воды (1 $м^3$) при данных гидравлических элементах может перемещать во взвешенном состоянии. Предполагается, что в потоке находится достаточное количество наносов всех крупностей, необходимых для его насыщения.

$$\rho_т = c_т\left(\ln\frac{u_в}{w_1} - \frac{u_в - w_1}{u_в}\right) кг/м^3.$$

$\rho_{кр}$ — критическая мутность потока, т. е. количество наносов, которое поток воды (1 $м^3$) при заданных гидравлических элементах может транспортировать во взвешенном состоянии из заданной начальной мутности и при составе наносов.

$$\rho_{кр} = c_0\left(\ln\frac{w_x}{w_1} - \frac{w_x - w_1}{w_{n+1}}\right) + c_0\left(\ln\frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в}\right).$$

$\rho_и$ — избыточная мутность потока. При поступлении воды из реки в канал или в отстойник с начальной мутностью ρ_0 транспортирующая способность потока уменьшается. В связи с этим часть наносов из начальной мутности поток не в состоянии транспор-

гировать. Эта часть наносов и представляет собой избыточную мутность и осаждается.

$$\rho_{и} = c_0 \left(\ln \frac{w_{n+1}}{w_x} - \frac{w_{n+1} - w_x}{w_{n+1}} \right) - c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_x} - \frac{u_в - w_x}{u_в} \right) кг/м^3.$$

$\rho_д$ — количество наносов, приходящееся на 1 $м^3$ воды, которое поток может транспортировать по дну и в придонном слое воды.

$$\rho_д = c_д \left[\ln \frac{u_д}{u_в} - \left(\frac{1}{u_в} - \frac{1}{u_д} \right) w_{\min д} \right] кг/м^3.$$

$\rho_{иh}$ — избыточная мутность потока в отстойнике на глубине h, $кг/м^3$.

$\rho_{их}$ — избыточная мутность потока в отстойнике в промежуточном створе, расположенном на расстоянии L_x от входа, $кг/м^3$.

$\rho_в$ — мутность потока на выходе из отстойника (головного), $кг/м^3$.

$\rho_{вв}$ — мутность потока на выходе из внутрисистемного отстойника, $кг/м^3$.

ρ_x — мутность потока в промежуточном створе отстойника, расположенном на расстоянии L_x от входа,

$$\rho_x = \rho_{кр} + \rho_{их} \; кг/м^3.$$

$\rho_{x_I}, \rho_{x_{II}}, \rho_{x_{III}}$ — мутность потока в промежуточных створах отстойника, расположенных соответственно в пределах первой, второй и третьей расчетных областей, $кг/м^3$.

$\rho_{H_I}, \rho_{H_{II}}, \rho_{H_{III}}$ — придонная мутность потока в створах отстойника, расположенных соответственно в пределах первой, второй и третьей расчетных областей при транспортирующей способности потока в отстойнике $\rho_т > 0$ $кг/м^3$:

$$\rho_{H_I} = \rho_0; \; \rho_{H_{II}} = c_0 \left(\ln \frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}} \right);$$

$$\rho_{H_{III}} = c_0 \left(\ln \frac{w_H}{w_1} - \frac{w_H - w_1}{w_{n+1}} \right) + c_т \left(\ln \frac{u_в}{w_н} - \frac{u_в - w_н}{u_в} \right) кг/м^3.$$

$\rho'_{H_I}, \rho'_{H_{II}}, \rho'_{H_{III}}$ — придонная мутность потока в створах отстойника, расположенных в пределах соответствующих расчетных областей при $\rho_т = 0$, $кг/м^3$.

$\rho_з$ — весовое количество наносов, которое осаждается в отстойнике из 1 $м^3$ воды. В головном отстойнике $\rho_з = \rho_0 - \rho_в$ $кг/м^3$.

$\rho_{в.изм}$ — величина измеренной мутности в конце отстойника, $кг/м^3$.

$\rho_{в.расч}$ — величина расчетной мутности в конце отстойника, *кг/м³*.

$\rho_{изм}$, $\rho_{расч}$ — величины измеренной и расчетной мутностей в каналах и на промежуточных створах в отстойнике, *кг/м³*.

$\rho_{з_I}$, $\rho_{з_{II}}$, $\rho_{з_{III}}$ — количество (вес) наносов, которые осаждаются в отстойнике из 1 *м³* воды при режиме осаждения в нем, соответствующем первой, второй или третьей расчетным областям, *кг/м³*.

$\rho_{зх}$ — весовое количество наносов, которые осаждаются из каждой единицы объема воды на протяжении L_x отстойника, *кг/м³*.

ρ_{0_i} — количество наносов i фракции, которое содержится в начальной мутности с гидравлической крупностью частиц в пределах w_i—w_{i+1}, составляет:

$$\rho_{0_i} = c_0 \left(\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{w_{n+1}} \right) кг/м^3.$$

Сумма всех фракций начальной мутности при делении наносов на n фракций будет:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \rho_{0_i} = \rho_0 \; кг/м^3.$$

ρ_i — удельное содержание наносов i фракции с крайними гидравлическими крупностями частиц w_i и w_{i+1} при делении наносов на n фракций составляет:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i = 1.$$

$\rho_{т_i}$, $\rho_{кр_i}$, $\rho_{и_i}$, ρ_{x_i}, $\rho_{в_i}$, $\rho_{з_i}$ и т. д. — весовое количество наносов i фракций в составах соответствующих мутностей в единице объема воды с гидравлическими крупностями частиц в пределах w_i и w_{i+1}, *кг/м³*.

j — относительная мутность потока — ордината кривой распределения по крупности взвешенных наносов при общей мутности потока, равной единице:

$$j = c \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}} \right) \frac{кг/м^3}{м/сек}.$$

j_0 — ордината кривой распределения наносов начальной (речной) мутности:

$$j_0 = c_0 \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{w_{n+1}} \right) \frac{кг/м^3}{м/сек}.$$

$j_т$ — ордината кривой распределения наносов при насыщении потока всеми крупностями частиц:

$$j_т = c_т \left(\frac{1}{w} - \frac{1}{u_в} \right) \frac{кг/м^3}{м/сек}.$$

c — постоянная кривой распределения по крупности наносов при мутности $\rho = 1{,}0$ *кг/м³*.

c_0 — постоянная кривой распределения наносов начальной мутности, *кг/м³*.

$c_т$ — постоянная кривой распределения по крупности наносов транспортирующей способности потока:

$$c_т = 200\, u_в \; кг/м^3.$$

w — гидравлическая крупность частиц наносов (скорость осаждения частиц в стоячей воде), *м/сек*.

w_0 — средняя гидравлическая крупность полного состава наносов, *м/сек*.

w_i — средняя гидравлическая крупность наносов фракции i, *м/сек*.

w_i и w_{i+1} — наименьшая и наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов фракции i, *м/сек*.

w_{min}, w_{max} или w_1 и w_{n+1} — наименьшая и наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов начальной мутности, *м/сек*.

w_m — наибольшая гидравлическая крупность частиц, которыми из наносов заданной (речной) мутности может быть полностью насыщен поток в канале или отстойнике:

$$w_m = 0{,}005\, c_0 \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}} + w_1 \; м/сек.$$

w_x — наименьшая гидравлическая крупность частиц наносов избыточной мутности при отсутствии в начальной мутности достаточного количества мелких частиц для насыщения потока:

$$w_x = \frac{c_т - c_0}{\frac{c_т}{u_в} - \frac{c_0}{w_{n+1}}} \; м/сек.$$

$w_и$ — наибольшая гидравлическая крупность избытка наносов, которые сохраняются во взвешенном состоянии в отстойнике на расстоянии L_x от входа в него:

$$w_и = \frac{vh}{L_x} \; м/сек.$$

$w_н$ — наибольшая гидравлическая крупность частиц избытка наносов у дна в отстойнике на расстоянии L_x от входа в него:

$$w_н = \frac{vH}{L_x} \; м/сек.$$

u — вертикальная составляющая скорости потока, *м/сек*.

$u_в$ — наибольшая взвешивающая скорость потока:

$$u_в = 0{,}065\,(v - 0{,}05)\,i^{1/4}\ м/сек.$$

$u_д$ — наибольшая гидравлическая крупность частиц наносов, которые поток передвигает по дну, *м/сек*.

d_{max} — наибольший диаметр частиц наносов, которые поток передвигает по дну. Значение d_{max} определяется при помощи равенства:

$$d_{max}\left(\lg\frac{8{,}8\,R}{d_{max}}\right)^2 = 0{,}053\,v^2.$$

В расчетах промыва отстойников нужно учитывать количество и состав поступающих в отстойник наносов как в период между промывами, так и в период промыва. Необходимо иметь также гидравлические элементы потока при осаждении наносов и промыве отстойника. Ниже элементы наносного и гидравлического режима потока при осаждении наносов обозначены дополнительным индексом «з», а при промыве отстойника — «п».

$\rho_{оз}$, $\rho_{тз}$ — начальная мутность и транспортирующая способность потока в отстойнике в среднем за период между промывами, *кг/м³*.

$\rho_{оп}$, $\rho_{тп}$ — начальная мутность и транспортирующая способность потока в отстойнике в период его промыва, *кг/м³*.

$\rho_{кр.з}$, $\rho_{крп}$ — критические мутности потока в отстойнике соответственно в период осаждения наносов и в период промыва, *кг/м³*.

$\rho_{из}$, $\rho_{ип}$, $\rho_{ир}$ — избыточная мутность в отстойнике соответственно в период осаждения наносов, в период его промыва и избыток, образуемый из размытых наносов, *кг/м³*.

$\rho_{дп}$ — вес наносов, который каждый кубометр воды при промыве отстойника может транспортировать по дну и в придонном слое воды, *кг/м³*.

$\rho_{пв}$ — вес наносов, который поток (1 *м³*) транспортирует при промыве отстойника во взвешенном состоянии, *кг/м³*.

$\rho_{т(в,д)}$ — полное количество наносов, которое поток транспортирует в донном и взвешенном состоянии, при насыщении его частицами всех фракций, *кг/м³*.

$\rho_п$ — количество размытых наносов, приходящееся на 1 *м³* промывного расхода воды.

$j_{оз}$, $j_{оп}$ — ординаты кривых распределения наносов начальной мутности, поступающих в отстойник между промывами и в период промыва, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$j_{тз}$, $j_{тп}$ — ординаты кривых распределения по крупности насыщающих поток наносов в отстойнике в период осаждения наносов и при промыве, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$j_{из}$, $j_{ип}$, $j_{ир}$ — ординаты кривых распределения наносов избыточных мутностей, которые образуются в отстойнике при осаждении наносов и промыве его, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$j_{их}$, $j_{х}$ — ординаты кривых распределения наносов избыточной и полной мутности в створе, расположенном на расстоянии L_x от входа, при осаждении наносов, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$j_{э}$ — ордината кривой распределения по крупности выпавших в отстойнике наносов в период его работы на осаждение, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$j_{дп}$ — ордината кривой распределения по крупности наносов, транспортируемых потоком по дну и в придонном слое воды при промыве, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$c_{оз}$, $c_{оп}$ — постоянные кривых распределения начальной мутности при осаждении наносов и при промыве отстойника, $кг/м^3$.

$c_{тз}$, $c_{тп}$ — постоянные кривых распределения по крупности транспортирующей способности потока в периоды работы отстойника на осаждение наносов и промыв отложений, $кг/м^3$.

$c_{дп}$ — постоянная кривой распределения по крупности донных наносов при промыве отстойника, $кг/м^3$.

$u_{вз}$, $u_{вп}$ — наибольшие взвешивающие скорости потока в отстойнике при заилении и промыве, $м/сек$.

$u_{дп}$ — наибольшая гидравлическая крупность наносов, которые поток в состоянии передвигать по дну отстойника при промыве, $м/сек$.

$w_{1з}$, $w_{(n+1)з}$, $w_{1п}$, $w_{(n+1)п}$ — наименьшие и наибольшие гидравлические крупности частиц начальной мутности в периоды осаждения наносов в отстойнике и при промыве его, $м/сек$.

$w_{min\ в}$, $w_{min\ д}$ — наименьшая гидравлическая крупность частиц наносов, которые поток транспортирует во взвешенном ($w_{min\ в}$) и донном ($w_{min\ д}$) состоянии, $м/сек$.

$w_{xз}$, $w_{xп}$ — наименьшая гидравлическая крупность частиц избытка наносов соответственно при их осаждении и промыве отстойника, $м/сек$.

w_{xm} — наименьшая гидравлическая крупность частиц наносов, которыми насыщается поток при промыве, $м/сек$.

$w_{H_з}$ — наибольшая гидравлическая крупность избытка наносов на выходе из отстойника при осаждении в нем наносов, *м/сек*.

w_{H_r}, $w_{H_{r+1}}$ — наибольшие гидравлические крупности частиц избытка наносов в створах, расположенных на расстоянии от входа:

$$l_r = \frac{H_з v_з}{w_{H_r}} \text{ и } l_{r+1} = \frac{H_з v_з}{w_{H_{r+1}}} \text{ м/сек.}$$

$w_{mз}$ — наибольшая гидравлическая крупность частиц, которыми из заданной мутности $\rho_{оз}$ может быть насыщен поток в отстойнике при осаждении наносов, *м/сек*.

m — численный коэффициент, на который необходимо умножить количество осевших в период заиления отстойника наносов для насыщения потока (1 $м^3$) при промыве его.

w_{max} — наибольшая гидравлическая крупность насыщающих поток частиц наносов при промыве отстойника, *м/сек*.

$u_{в\,max}$ — наибольшая вертикальная составляющая скорость, при которой частицы наносов с гидравлической крупностью w_{max} находятся во взвешенном состоянии, *м/сек*.

$k_у$ — безразмерный коэффициент, характеризующий степень осветления потока в отстойнике в период его заиления.

$j_{тс}$, $j_{дс}$ — ординаты кривых распределения по крупности наносов транспортирующей способности потока ($j_{тс}$) и донных наносов ($j_{дс}$) в сбросном канале при промыве отстойника, $\frac{кг/м^3}{м/сек}$.

$c_{тс}$, $c_{дс}$ — постоянные кривых распределения транспортирующей способности потока и донных наносов в сбросном канале при промыве отстойника, $кг/м^3$.

$\rho_{тс}$, $\rho_{дс}$ — транспортирующая способность потока в отношении взвешенных и донных наносов в сбросном канале при промыве отстойника, $кг/м^3$.

$u_{вс}$, $u_{дс}$ — наибольшие гидравлические крупности частиц наносов, которые поток при промыве отстойника может транспортировать в сбросном канале соответственно во взвешенном и донном состоянии, *м/сек*.

В работе использованы сокращенные записи формул, в которых индексы подобраны по следующему признаку.

Речная (начальная) мутность или ее часть обозначена «0». Эта же мутность в период осаждения наносов в отстойнике будет с индексом «оз» и при промыве — «оп» ($\rho_о$, $\rho_{оз}$ и $\rho_{оп}$). Так же обозначается транспортирующая способность потока $\rho_т$, которая

при осаждении наносов записывается в виде $\rho_{тз}$ и при промыве — $\rho_{тп}$.

Чтобы выразить часть наносов или отдельную фракцию их, например фракцию в пределах крупностей w_i и w_{i+1}, к указанным выше индексам добавляют пределы крупностей w_i и w_{i+1}. Таким образом, весовое количество наносов начальной мутности в указанных пределах обозначают $\rho_{0\,[w_i,\ w_{(i+1)}]}$ при осаждении наносов в отстойнике $\rho_{оз(w_i,\ w_{i+1})}$ и при промыве его — $\rho_{оп(w_i,\ w_{i+1})}$, а транспортирующую способность потока $\rho_{т\,(w_i,\ w_{i+1})}$, $\rho_{тз\,(w_i,\ w_{i+1})}$ и $\rho_{тп\,(w_i,\ w_{i+1})}$ и т. д. Ниже приведены выражения некоторых из них, которые довольно часто употребляются в работе.

Полное значение начальной мутности:

$$\rho_0 = c_0 \left(\ln \frac{w_{n+1}}{w_1} - \frac{w_{n+1} - w_1}{w_{n+1}} \right) кг/м^3.$$

Количество наносов начальной мутности в пределах крупностей w_1—$w_н$:

$$\rho_{0\,(w_1,\ w_н)} = c_0 \left(\ln \frac{w_н}{w_1} - \frac{w_н - w_1}{w_{n+1}} \right) кг/м^3.$$

Полное значение начальной мутности, которое поступает в отстойник в период между промывами:

$$\rho_{оз\,[w_{1з},\ w_{(n+1)\,з}]} = c_{оз} \left(\ln \frac{w_{(n+1)\,з}}{w_{1з}} - \frac{w_{(n+1)\,з} - w_{1з}}{w_{(n+1)\,з}} \right) кг/м^3.$$

Фракции наносов начальной мутности $\rho_{оз}$ в пределах крупностей w_i—w_{i+1}, $w_{нз}$—$w_{(n+1)з}$, $w_{хп}$—w_{max} и т. д. соответственно будут:

$$\rho_{оз\,(w_i,\ w_{i+1})} = c_{оз} \left(\ln \frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1} - w_i}{w_{(n+1)\,з}} \right);$$

$$\rho_{оз\,[w_{Нз},\ w_{(n+1)\,з}]} = c_{оз} \left(\ln \frac{w_{(n+1)\,з}}{w_{Нз}} - \frac{w_{(n+1)\,з} - w_{Нз}}{w_{(n+1)\,з}} \right) кг/м^3;$$

$$\rho_{оз\,(w_{хп},\ w_{max})} = c_{оз} \left(\ln \frac{w_{max}}{w_{хп}} - \frac{w_{max} - w_{хп}}{w_{(n+1)\,з}} \right).$$

Полное значение транспортирующей способности потока при работе отстойника на заиление составляет:

$$\rho_{тз\,(w_{1з},\ u_{вз})} = c_{тз} \left(\ln \frac{u_{вз}}{w_{1з}} - \frac{u_{вз} - w_{1з}}{u_{вз}} \right),$$

а выражения отдельных фракций наносов этой мутности в *кг/м³* будут:

$$\rho_{\text{тз}}\,(w_i,\ w_{i+1}) = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{w_{i+1}}{w_i} - \frac{w_{i+1}-w_i}{u_{\text{вз}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тз}}\,(w_{\text{Нз}},\ u_{\text{вз}}) = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{u_{\text{вз}}}{w_{\text{Нз}}} - \frac{u_{\text{вз}}-w_{\text{Нз}}}{u_{\text{вз}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тз}}\,(w_{\text{Нз}},\ w_{\max}) = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{w_{\max}}{w_{\text{Нз}}} - \frac{w_{\max}-w_{\text{Нз}}}{u_{\text{вз}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тз}}\,(w_{xm},\ w_{\max}) = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{w_{\max}}{w_{xm}} - \frac{w_{\max}-w_{xm}}{u_{\text{вз}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тз}}\,(w_{xm},\ u_{\text{вз}}) = c_{\text{тз}}\left(\ln\frac{u_{\text{вз}}}{w_{xm}} - \frac{u_{\text{вз}}-w_{xm}}{u_{\text{вз}}}\right).$$

Значение начальной мутности потока при промыве отстойника имеет вид:

$$\rho_{\text{оп}} = c_{\text{оп}}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\,\text{п}}}{w_{1\text{п}}} - \frac{w_{(n+1)\,\text{п}}-w_{1\text{п}}}{w_{(n+1)\,\text{п}}}\right)\ кг/м^3,$$

а выражения отдельных фракций этой мутности в *кг/м³* следующие:

$$\rho_{\text{оп}}\,[w_{x\text{п}},\ w_{(n+1)\,\text{п}}] = c_{\text{оп}}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\text{п}}}{w_{x\text{п}}} - \frac{w_{(n+1)\,\text{п}}-w_{x\text{п}}}{w_{(n+1)\,\text{п}}}\right);$$

$$\rho_{\text{оп}}\,(w_{xm},\ w_{x\text{п}}) = c_{\text{оп}}\left(\ln\frac{w_{x\text{п}}}{w_{xm}} - \frac{w_{x\text{п}}-w_{xm}}{w_{(n+1)\text{п}}}\right);$$

$$\rho_{\text{оп}}\,[w_{xm},\ w_{(n+1)\,\text{п}}] = c_{\text{оп}}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\,\text{п}}}{w_{xm}} - \frac{w_{(n+1)\,\text{п}}-w_{xm}}{w_{(n+1)\,\text{п}}}\right);$$

$$\rho_{\text{оп}}\,[w_{x\text{с}},\ w_{(n+1)\,\text{п}}] = c_{\text{оп}}\left(\ln\frac{w_{(n+1)\,\text{п}}}{w_{x\text{с}}} - \frac{w_{(n+1)\text{п}}-w_{x\text{с}}}{w_{(n+1)\,\text{п}}}\right).$$

Транспортирующая способность потока в отстойнике при промыве составляет:

$$\rho_{\text{тп}}\,(w_{1\text{п}},\ u_{\text{вп}}) = c_{\text{тп}}\left(\ln\frac{u_{\text{вп}}}{w_{1\text{п}}} - \frac{u_{\text{вп}}-w_{1\text{п}}}{u_{\text{вп}}}\right)\ кг/м^3,$$

а отдельные ее фракции в *кг/м³*:

$$\rho_{\text{тп}}\,(w_{x\text{п}},\ u_{\text{вп}}) = c_{\text{тп}}\left(\ln\frac{u_{\text{вп}}}{w_{x\text{п}}} - \frac{u_{\text{вп}}-w_{x\text{п}}}{u_{\text{вп}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тп}}\,(w_{xm},\ w_{x\text{п}}) = c_{\text{тп}}\left(\ln\frac{w_{x\text{п}}}{w_{xm}} - \frac{w_{x\text{п}}-w_{xm}}{u_{\text{вп}}}\right);$$

$$\rho_{\text{тп}}\,(w_{xm},\ u_{\text{вп}}) = c_{\text{тп}}\left(\ln\frac{u_{\text{вп}}}{w_{xm}} - \frac{u_{\text{вп}}-w_{xm}}{u_{\text{вп}}}\right).$$

Таким же образом обозначены как полные значения, так и отдельные фракции других мутностей потока: донные наносы ($\rho_{дн}$), взвешенные наносы при промыве отстойника ($\rho_{пв}$), наносные отложения в отстойнике ($\rho_з$) и т. д.

Для сокращения записи в работе использованы краткие обозначения отдельных выражений с теми же индексами, что и у мутности. Ниже приведены эти обозначения:

$$\frac{c_о}{w_{(n+1)}} = a_0;\ \frac{c_{оз}}{w_{(n+1)\,з}} = a_{оз};\ \frac{c_т}{u_в} = a_т;\ \frac{c_{тз}}{u_{вз}} = a_{тз};$$

$$(w_H - w_{\min з})(2w_{n+1} - w_н - w_{\min}) = b_{0\,(w_{\min},\ w_н)};$$

$$(w_{Hз} - w_{\min з})(2w_{(n+1)\,з} - w_{Hз} - w_{\min з}) = b_{оз\,(w_{\min з},\ w_{Hз})};$$

$$(w_{i+1} - w_i)(2w_{(n+1)\,з} - w_{i+1} - w_i) = b_{оз\,(w_{i+1},\ w_i)};$$

$$(w_{xm} - w_{\min з})(2w_{(n+1)\,з} - w_{xm} - w_{\min з}) = b_{о\,(w_{\min з},\ w_{xm})};$$

$$(w_{Hз} - w_{xm})(2w_{(n+1)\,з} - w_{Hз} - w_{xm}) = b_{оз\,(w_{xm},\ w_{Hз})};$$

$$(w_{\max} - w_{xm})(2w_{(n+1)\,з} - w_{\max} - w_{xm}) = b_{оз\,(w_{xm},\ w_{\max})};$$

$$(w_H - w_{\min})(2u_в - w_H - w_{\min}) = b_{т\,(w_{\min},\ w_H)};$$

$$(w_{Hз} - w_{\min з})(2u_{вз} - w_{Hз} - w_{\min з}) = b_{тз\,(w_{\min з},\ w_{Hз})};$$

$$(w_{i+1} - w_i)(2u_{вз} - w_{i+1} - w_i) = b_{тз\,(w_i,\ w_{i+1})};$$

$$(w_{xm} - w_{\min з})(2u_{вз} - w_{xm} - w_{\min з}) = b_{тз\,(w_{\min з},\ w_{xm})};$$

$$(w_{Hз} - w_{xm})(2u_{вз} - w_{Hз} - w_{xm}) = b_{тз\,(w_{xm},\ w_{Hз})};$$

$$(w_{\max} - w_{xm})(2u_{вз} - w_{\max} - w_{xm}) = b_{тз\,(w_{xm},\ w_{\max})}.$$

$$(w_{n+1} - w_{\min})^2 = d_0;\ (w_{(n+1)\,з} - w_{\min з})^2 = d_{оз};$$

$$(w_{(n+1)\,з} - w_{xm})^2 = e_{оз};$$

$$(u_в - w_{\min})^2 = d_т;\quad (u_{вз} - w_{\min з})^2 = d_{тз};\quad (u_{вз} - w_{xm})^2 = e_{тз}.$$

$$w_x = \frac{c_т - c_0}{a_т - a_0} \text{ и } w_{xз} = \frac{c_{тз} - c_{оз}}{a_{тз} - a_{оз}}.$$

Значения $w_{\min}$ и $w_{\min з}$ при w_x или $w_{xз} \leqslant w_{1з}$ принимаются $w_{\min} = w_1$ и $w_{\min з} = w_{1з}$ и при w_x и $w_{xз} > w_1$ и $w_{1з}$ будут $w_{\min} = w_x$ и $w_{\min з} = w_{xз}$. При этом формулы для определения w_x и $w_{xз}$ имеют вид:

$$w_x = \frac{c_т - c_0}{a_т - a_0} \quad \text{и} \quad w_{xз} = \frac{c_{тз} - c_{оз}}{a_{тз} - a_{оз}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Абальянц С. Х. Движение взвесей в открытых потоках. Труды Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации, выпуск 96, 1958.
2. Алтунин С. Т. Водозаборные узлы и водохранилища. Изд. «Колос» 1964.
3. Алтунин С. Т. Заиление водохранилищ и размыв русла в нижнем бьефе плотин. Русловые процессы. Сборник статей, издание АН СССР 1958.
4. Алтунин С. Т. Регулирование русел. Сельхозгиз, 1956.
5. Аннаев С. А. Русловые процессы на Каракумском канале. Известия АН Туркменской ССР, серия физико-технических и геологических наук, № 5, 1962.
6. Барекян А. Ш. Расход донных наносов и устойчивость русел рек. Труды ВНИИГиМ, т. XXXV, 1960.
7. Барекян А. Ш. Расход руслоформирующих наносов и элементы песчаных волн. Метеорология и гидрология, т. 8, 1962.
8. Великанов М. А. Динамика русловых потоков. т. II. Госиздат, технико-теоретической литературы, 1955.
9. Гвелесиани Г. Г., Шмальцель Н. П. Исследование заиления и занесения горных водохранилищ. Известия ТНИСГЕИ, т. X, 1958.
10. Гончаров В. Н. Движение наносов. ОНТИ, 1938.
11. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков. Гидрометеоиздат, 1954.
12. Данелия Н. Ф. Водозаборные сооружения на реках с обильными донными наносами. Изд. «Колос», 1964.
13. Дульнев В. Б. Абразивный износ радиально-осевых гидротурбин и методы борьбы с ними ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. Госэнергоиздат, 1962.
14. Кирста Б. Т. Мутность воды рек Туркмении. Известия АН Туркменской ССР, серия физико-технических, химических и геологических наук, № 4, 1961.
15. Леви И. И. Динамика русловых потоков. Госэнергоиздат, 1957.
16. Михеев П. В., Юневич Д. П. Регулирование русел в мелиоративных целях. Сельхозгиз, М., 1959.
17. Нацвлишвили А. Г. Расчет промыва наносных отложений из отстойников оросительных систем. Техническая информация, Тбилиси, 1963.
18. Нацвлишвили А. Г. Опыт промыва наносов из отстойника Баграм-Тапинского гидроузла. Журнал «Гидротехника и мелиорация» № 6, 1963.
19. Салахов Ф. С. Гидравлический расчет ирригационных отстойников. Труды Азербайджанского НИИГиМ, т. V, 1964.
20. Салахов Ф. С. Отстойники с гидромеханической очисткой посредством передвижного сифона. Журн. «Гидротехника и мелиорация» № 9, 1959.

21. Тер-Абрамянц Г. А. Результаты исследований гидравлической промывки на крупномасштабной модели отстойника Каракумского канала. Труды ВНИИГим, т. 43, Гидромеханика, 1965
22. ТУиН проектирования гидротехнических сооружений. Отстойники Гидроэлектрических станций. Госэнергоиздат, 1949.
23. Хачатрян А. Г. Отстойники на оросительных системах. Сельхозгиз, 1957.
24. Царевский А. М. Гидромеханизация мелиоративных работ. Сельхозгиз, 1963.
25. Цветикова Н. Ф. Технические условия и нормы по проектированию ирригационных отстойников. Вопросы гидротехники, вып. 19, изд АН Узб. ССР, 1964.
26. Чугаев Р. Р. О неравномерном медленно изменяющемся движении жидкости в открытых руслах. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, т. 61, 1958.
27. Шамов Г. И. Речные наносы. Гидрометеоиздат, 1954.
28. Шамов Г. И. Заиление водохранилищ. Гидрометеоиздат, 1939.
29. Шапиро Х. Ш. Исследование динамики осаждения наносов в камерах крупномасштабной модели отстойника на головном участке Каракумского канала. Труды ВНИИГиМ, т. 43, Гидротехника, 1965.
30. Шапиро Х. Ш. О расчетном фракционном составе взвешенных наносов рек Аму-Дарьи и Теджен. Бюллетень технико-экономической информации ГИТК, Туркменской ССР № 7, 1961.
31. Шаумян В. А., Хачатрян А. Г. Струенаправляющие системы. Сельхозгиз, 1953.
32. Шейнкин Г. Ю. Озерные отстойники на оросительных системах. Изд. ИРФОН, Душанбе, 1965.
33. Ягодин. Н. Н. Заиление верхнего бьефа и эксплуатация гидроузлов. Журн. Гидротехническое строительство № 8, 1955.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

Глава I. **Осаждение наносов в отстойнике** 7

§ 1. Сущность предлагаемого метода расчета осаждения наносов в отстойнике 7

§ 2. Исследования динамики осаждения наносов в подводящих каналах водозабора в Каракумский канал 16

§ 3. Результаты натурных исследований по осаждению наносов в отстойнике Баграм-Тапинского гидроузла 21

§ 4. Рекомендации по расчету ирригационных отстойников 28

Глава II. **Расчет промыва ирригационных отстойников** 46

§ 5. Состав отложившихся в отстойнике наносов 47

§ 6. Размыв русла и насыщение потока взвешенными и донными наносами 58

§ 7. Расход и состав донных наносов 62

§ 8. Наибольшая крупность частиц донных наносов 69

§ 9. Наименьшая крупность частиц донных наносов 75

§ 10. Значение постоянной $c_д$ кривой распределения по крупности донных наносов 78

§ 11. Расчет предельного насыщения потока в отстойнике при его промыве 81

§ 12. Динамика насыщения потока в отстойнике при промыве 99

§ 13. Критическая мутность потока в сбросном канале 108

§ 14. Упрощенные формулы по расчету насыщения потока наносами и пределы их применения 113

§ 15. Пример расчета и сопоставление расчетных и измеренных величин 117

Глава III. **Заиление русловых водохранилищ, его расчет и промыв отложений** 133

§ 16. Режим взвешенных наносов р. Теджен 135

§ 17. Осаждение наносов в водохранилище 137

§ 18. Траспортирующая способность речного потока 143
§ 19. Русловые процессы в реке и в чаше водохранилища 143
§ 20. Распределение по глубине взвешенных наносов в реке и объемный вес донных отложений 148
§ 21. Мероприятия по сокращению заиления 1-го Тедженского водохранилища 153
§ 22. Ширина поверху формируемого потоком русла и форма его поперечного сечения 155
§ 23 Методика расчета сроков заиления водохранилищ и выклинивания подпора 162
§ 24. Учет изменения руслового режима реки при возведении гидроузлов на притоках 176
§ 25. Промыв отложений из водохранилищ и мероприятия по сокращению их заиления 190

Глава IV. **Озерные отстойники и расчет их заиления** 203
§ 26. Исследование заиления Келифских озер на трассе Каракумского канала 203
§ 27. Методика расчета заиления озерных отстойников 216
§ 28. Принятые обозначения 226
Литература 236

Хачатрян А. Г., Шапиро Х. Ш., Шарова З. И.

ЗАИЛЕНИЕ И ПРОМЫВ ИРРИГАЦИОННЫХ ОТСТОЙНИКОВ И ВОДОХРАНИЛИЩ. М., изд-во «Колос», 1966.
239 с.

УДК 626.81 : 628.334.1

Редактор *Г. А. Стольникова*
Художник *Т. М. Чеховский*
Художественный редактор *А. С. Золотцева*
Технический редактор *Г. Б. Алексеева*
Корректор *М. И. Бынеев*

Сдано в набор 16/VI 1966 г. Подписано к печати 15/XI 1966 г. Т-15817 Формат 60×90¹/₁₆. Печ. л. 15. Уч.-изд. л. 12,38. Изд. № 290. Т. п. 1966 г. № 167. Тираж 3 500 экз. Заказ № 773. Цена 69 коп.

Издательство «Колос», Москва, К-31, ул. Дзержинского, д. 1/19.

Владимирская типография Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР
Гор. Владимир, ул. Победы, д. 18б