

6. ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

6.1. Общая характеристика процессов заиления водохранилищ

Заиление водохранилища обусловлено осаждением в его чаще наносов, поступающих с водосбора вместе с жидким стоком рек и ручьев, питающих водохранилище, а также твердого материала, попадающего в водоем в результате размыва его берегов или ветрового (золотого) переноса пыли с прилегающих участков суши. Отложения, сформировавшиеся в водохранилище в процессе его заиления, образуют так называемое тело заиления.

Главным фактором заиления обычно считается сток наносов, и ему уделяется основное внимание при проектировании водохранилищ. Вопросу заиления водоема за счет обрушения берегов уделяется особое внимание при проектировании водохранилищ в руслах и долинах с высокими берегами, сложенными рыхлыми, легко размываемыми породами, например лёссами. Золотой фактор заиления учитывается при проектировании сравнительно малых водохранилищ и прудов в тех засушливых районах, где часто наблюдаются пыльные бури.

Перенос и осаждение наносов в водохранилищах во многом определяются структурой течений, ветро-волновыми явлениями и турбулентностью водных масс. Поэтому прежде чем перейти к рассмотрению процессов перемещения наносов в водохранилищах кратко остановимся на основных аспектах динамики водоемов.

Динамическая структура водохранилищ отличается большей сложностью, чем структура речных потоков. Это обусловлено как своеобразием морфологии ложа водохранилищ, так и наличием добавочных факторов, воздействующих на водные массы. Одним из таких факторов является воздействие ветра на водную поверхность, приводящее к образованию ветровых течений, ветровых волн и длиннопериодных колебаний свободной поверхности. В наибольшей степени транзит и переотложение наносов в водоемах определяются течениями и волнением.

Основными видами течений в замкнутых водоемах являются сточные (именуемые иногда стоковыми), ветровые и конвекционные течения. Последние связаны с плотностной неоднородностью водных масс, обусловленной их термической неоднородностью или же неравномерным распределением взвешенных и рас-

творенных веществ. Конвективные течения наряду с другими, не упомянутыми здесь видами течений обычно отличаются меньшей интенсивностью, чем сточные и ветровые течения.

Сложность структуры течений замкнутых водоемов объясняется следующими основными причинами: 1) сложностью формы водоема и пространственным развитием течений; 2) плотностной стратификацией водных масс, характерной, однако, для относительно глубоких водоемов; 3) развитием течений под влиянием одновременного действия нескольких факторов (поверхностного уклона, ветра, плотностной неоднородности, ветрового волнения и т. д.); наложением одного вида течений на другое, их взаимным влиянием; 4) наличием остаточных течений, существующих в силу инерции водных масс некоторое время после прекращения действия вызвавших их факторов. Заметим, что можно различать остаточные ветровые, остаточные сточные течения и т. д. На остаточные течения накладываются течения, возникающие под влиянием вступающих в действие новых факторов.

Фактических материалов о течениях в больших озерах и водохранилищах в литературе имеется мало, общие схемы течений для конкретных водоемов приводятся крайне редко.

До сих пор не существует достаточно удовлетворительной методики расчета течений озер и водохранилищ. Известные способы расчета установившихся ветровых течений применимы лишь в простейших случаях. В более сложных случаях они могут давать лишь самое общее представление о возможных величинах и направлениях течений на больших участках водоемов. Расчеты сточных течений проточных водоемов также недостаточно совершенны и разработаны лишь для простейших случаев. Одним из первых предложений по методике расчета транзитных сточных течений в водоемах было предложение Н. М. Бернадского [21]. Разработанный им приближенный метод расчета этих течений с некоторыми усовершенствованиями применяется и до настоящего времени. Расчетные зависимости Бернадского основаны на уравнениях продольного и поперечного равновесия транзитных струй потока. Вычисления производятся методом последовательных приближений, при этом предварительная наметка положения транзитных струй и водоворотных зон делается на основании общих соображений. Затем выполняются вычисления для каждой струи и одновременно производится увязка решений по соседним струям.

А. В. Караушев в монографии 1960 г. [58] предлагает строить предварительную схему транзитных течений на основании лабораторного эксперимента, осуществляемого в малом масштабе, а затем уточнять схему течений, используя расчетный метод Бернадского или выведенные им формулы.

Представляет большой интерес исследование переноса наносов отдельными транзитными струями в водохранилищах.

Применяя к каждой струе уравнение продольного распределения мутности, можно получить распределение этой величины как по длине, так и по ширине водохранилища [58]. При решении обычных инженерных задач, направленных на выяснение срока службы или эксплуатационных качеств водохранилищ, эта методика не используется. Как правило, базируются на средних по сечению характеристиках сточного течения, получаемых для отдельных участков водохранилища или же для водоема в целом.

Натурные исследования заиления водохранилищ ведутся с конца прошлого — начала текущего столетий. Особое внимание, однако, этому вопросу стали уделять начиная с 1920—1930 гг., когда появились первые серьезные публикации советских и зарубежных ученых (А. Шоклич [217], А. Ф. Бурков [14], Б. В. Поляков [122] и т. д.).

Одной из первых обобщающих работ, указывающей определенные пути расчета заиления водохранилищ, явилась работа Ф. Орта [213]. Почти одновременно обобщающие теоретические разработки выполнялись в Советском Союзе, при этом особого внимания заслуживают исследования И. И. Леви [84] и Г. И. Шамова [168]. Из зарубежных следует упомянуть работу Д. Брена [186], который построил на основании многочисленных натурных данных интересный обобщающий график связи наносодерживающей способности водоема и его относительной емкости. Этот график получил распространение в литературе, посвященной методике расчета заиления водоемов.

Весьма детальные натурные исследования процесса заиления Фархадского водохранилища на р. Сырдарье выполнены в 50-х годах С. Т. Алтуниным [3]. Исследования носили комплексный характер, отличались большой детальностью и позволили сделать некоторые существенные выводы общего характера. В заключение Алтунин сделал некоторые предложения по методике расчета заиления водохранилищ.

Представляют интерес результаты натурных исследований заиления водохранилища Мид в США, изложенные в работе С. Веттера [232].

Следует отметить натурные исследования С. А. Джамалова [33] по изучению заиления водохранилищ на горных реках, а также детальные исследования процессов заиления малых водохранилищ на равнинных реках, выполненные Г. В. Лопатиным [94], К. Н. Лисициной [86] и А. И. Молдовановым [114].

Важное познавательное значение имели комплексные работы экспедиции ГГИ на Кайраккумском водохранилище (Ю. И. Иванов [49], А. С. Судольский и др. [156]). Большие комплексные гидрологические исследования на водохранилищах и их водосборах в предгорных районах Северного Кавказа были выполнены экспедицией Института Озероведения АН СССР (М. Я. Прыткова, В. Я. Фролов, И. С. Бойко и др. [127]).

На основе анализа данных натурального изучения заиления водохранилищ при использовании ряда положений теории транспорта наносов разрабатывались методы расчета. Выше уже упоминались работы Орта, Брена и Шамова, давших рекомендации по приближенным методам расчета заиления. На работах Г. И. Шамова следует остановиться подробнее. В 1939 г. им впервые была составлена обобщающая монография по проблеме заиления водохранилищ. В ней даны анализ и обобщение всех известных в то время отечественных и зарубежных исследований, рассмотрены основные аспекты этой проблемы и предложен сравнительно простой приближенный метод расчета общего заиления водохранилища, позволяющий по данным о морфометрии водоема и о стоке наносов получить хронологический ход заиления. Метод Шамова получил широкое распространение в инженерной практике.

В последующие годы ряд детальных методов расчета заиления водохранилищ был предложен М. А. Мостковым [115], К. Н. Россинским и И. А. Кузьминым [145], А. В. Караушевым [62, 64] и др. Методы Караушева, Россинского и Кузьмина наряду с упрощенными методами вошли в изданные ГГИ совместно с Гидропроектом «Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании» [159], являющиеся официальным нормативным документом, предназначенным для расчета водохранилищ. Первое издание Указаний вышло в свет в 1968 г., а второе — в 1973 г.

В 1973 г. в США также была опубликована работа, содержащая рекомендации по расчету заиления прудов и водохранилищ [219].

При изучении и расчете заиления водохранилищ и прудов используется ряд показателей, связывающих те или иные параметры водоема с гидрологическими характеристиками соответствующего речного бассейна и условиями аккумуляции наносов в водоеме. Внешний водообмен водоема, обусловленный его проточностью, может быть охарактеризован показателем условной продолжительности водообмена T_y , выражаемым следующим соотношением:

$$T_y = \frac{W}{V_{\Pi}}, \quad (6.1)$$

где W — объем водохранилища при НПГ, m^3 ; V_{Π} — средний за многолетие годовой приток воды в водохранилище, т. е. сток питающей его реки, $m^3/год$. Величина T_y выражается в годах; численно она равна так называемой относительной емкости водохранилища \tilde{W} , определяемой по формуле

$$\tilde{W} = \frac{W}{V_{\Pi*}}, \quad (6.2)$$

где, однако, предполагается, что средний за многолетие годовой приток $V_{\text{пр}}$ выражен в м^3 . Очевидно, что в таком виде относительная характеристика емкости является безразмерной величиной, выражающей долю объема водохранилища, приходящуюся на единицу объема годового стока притока.

Показатель условной заиляемости t_y представляет собой продолжительность полного заиления водохранилища (до емкости первоначального русла ω_p , пропускающего сток наносов транзитом) при условии полного осаждения поступающих в водоем наносов. Объем ω_p находится приближенно по формуле

$$\omega_p = \omega_p L_p, \quad (6.3)$$

где ω_p и L_p — соответственно площадь поперечного сечения (м^2) и длина (метры) русла, сформированного рекой в аккумулятивных отложениях на месте заиленного водохранилища. Величину ω_p обычно принимают равной бытовой площади сечения речного русла, а L_p считают равной длине водохранилища, измеренной с учетом возможных искривлений потока. Значение t_y находится из соотношения

$$t_y = \frac{W - \omega_p}{V_S}, \quad (6.4)$$

а при $\omega_p \ll W$ определяется равенством

$$t_y = \frac{W}{V_S}, \quad (6.5)$$

где V_S — средний за многолетие годовой сток наносов реки, питающей водохранилище, выраженный в объемных единицах ($\text{м}^3/\text{год}$). Пересчет стока наносов Π_S в $\text{кг}/\text{год}$ при этом выполняется по плотности донных отложений $\rho_{\text{отл}}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$) заиляемого водоема по формуле

$$V_S = \frac{\Pi_S}{\rho_{\text{отл}}}. \quad (6.6)$$

Действительная продолжительность полного заиления водохранилища всегда больше t_y . Это обусловлено тем, что в течение всего периода заиления (водохранилища малой относительной емкости) или же на заключительной стадии заиления (водохранилища большой емкости) определенная часть наносов проходит водоем транзитом и сбрасывается в нижний бьеф.

Соответственно очень важным показателем водоема является его относительная наносодерживающая способность $\tilde{\Pi}_a$, показывающая долю годового стока наносов, осаждающуюся в водохранилище. Если годовой приток наносов в водохранилище обозначить Π_S , а годовой сброс наносов через плотину (т. е.

через конечный створ водохранилища) обозначить $P_{\text{скон}}$, то годовая аккумуляция наносов выразится разностью

$$P_a = P_s - P_{\text{скон}}, \quad (6.7)$$

а для относительной наносоудерживающей способности водоема будем иметь

$$\tilde{P}_a = \frac{P_a}{P_s} = 1 - \frac{P_{\text{скон}}}{P_s}. \quad (6.8)$$

В процессе заиления водоема P_a уменьшается. При достижении $P_a = 0$ все поступающие к начальному створу водохранилища наносы проходят через него транзитом. Это имеет место тогда, когда водоем заиляется настолько, что превращается в одно или ряд русел, проложенных в речных отложениях, и полностью теряет свое регулирующее значение.

Процессы осаждения наносов в водохранилищах и формирования тела заиления зависят от целого ряда факторов, среди которых в первую очередь необходимо упомянуть следующие: относительную емкость и конфигурацию водохранилища, размер и режим стока наносов реки, на которой создано водохранилище, гранулометрический состав транспортируемых наносов, режим сработки и наполнения водохранилища, форму и динамику кривых подпора (особенно в зоне выклинивания подпора).

По морфометрическим признакам водохранилища можно подразделить на следующие основные группы: 1) озерные и озеровидные, 2) речные, 3) озерно-речные. Озерные водохранилища — это озера, оказавшиеся в искусственном подпоре и используемые как регулирующие емкости гидроэлектростанций (например, Байкал), а озеровидные водохранилища — вновь созданные водоемы, характеризующиеся большой шириной бьефа или наличием ряда широких плесов (Рыбинское, Цимлянское водохранилища). Речные водохранилища отличаются сильно вытянутой в направлении стока формой, сравнительно небольшой шириной и характеризуются простой структурой сточного транзитного течения (Горьковское, Днепродзержинское водохранилища). Озерно-речные водохранилища совмещают признаки указанных выше двух типов; для них характерно наличие широкого озерного плеса и сравнительно узкой речной части (Бухтарминское водохранилище).

Большое влияние на заиление водоемов оказывает интенсивность водообмена. Эта величина, как указывалось выше, количественно может быть выражена показателем T_y , который непосредственно может использоваться для сравнительной оценки водохранилищ.

Процесс заиления существенным образом зависит от структуры и интенсивности транзитных сточных течений в водоемах. Структура течений тесно связана с морфометрией водоема, а интенсивность — с показателем водообмена. Большую роль

играют также режим стока и характер его регулирования водохранилищем. Могут иметь место случаи, когда в период сброса из водохранилища части паводочных вод тело заиления подвергается более или менее значительному размыву, при этом продукты размыва сбрасываются в нижний бьеф. Для периодов сработки водохранилища характерно сползание в сторону плотины тела заиления за счет размыва его верхней части и отложения наносов в нижней.

В озеровидных водохранилищах наблюдается резкий переход потока от естественного режима к подпорному. В месте впадения потока происходит растекание струй (дивергенция течения), формирующееся здесь течение приобретает форму конуса с вершиной в устье реки. В зоне дивергенции течений за счет преимущественно крупных фракций наносов формируется веерообразная дельта, размеры которой с течением времени увеличиваются, а ее фронтальный край смещается в сторону плотины. Мелкие наносы также частично откладываются в дельтовой зоне, частично выносятся в открытую часть водохранилища, а в некоторых случаях достигают плотины и могут попадать в нижний бьеф.

В речных водохранилищах, характеризующихся постепенным снижением скоростей течения по длине, наблюдается более равномерное осаждение наносов вдоль верхнего бьефа. В тех случаях, когда в речные водохранилища поступают крупные фракции наносов, отложения концентрируются в начале бьефа. Постепенно зона осаждения наносов перемещается в сторону плотины. При заилении речных водохранилищ зона выклинивания подпора несколько смещается вверх по течению; это приводит к тому, что и тело заиления растет не только в сторону плотины, но в некоторой мере и вверх по реке.

Характер заиления озерно-речных водохранилищ зависит от того, каким образом расположены озеровидная и речная части водоема. Если в верхней части водохранилища находится озеровидный бьеф, то заиление происходит по типу заиления озеровидных водохранилищ. Если же в верхней части расположена узкая речная часть водохранилища, то заиление верхней части происходит по типу заиления речного водохранилища, а заиление озеровидной части будет протекать либо по типу заиления озеровидных бьефов, когда сюда доходят сравнительно крупные фракции наносов, либо будет характеризоваться сравнительно равномерным по всей площади водоема осаждением мелких фракций.

На рис. 34 в качестве примера изображен продольный профиль речного водохранилища. Показана линия первоначального дна водохранилища и тело заиления, сформировавшиеся по прошествии нескольких лет эксплуатации.

Существенно различаются процессы заиления водохранилищ, созданных на равнинных и горных реках. Заиление равнинных

водохранилищ происходит главным образом за счет взвешенных наносов, области осаждения которых охватывают нередко очень большие пространства водоема. В процессе заиления горных водохранилищ большую роль играют влекомые наносы. Их отложение происходит в первую очередь в зоне выклинивания подпора и лишь постепенно область занесения наносами смещается вниз. Формирование тела отложения влекомых наносов особенно чутко реагирует на изменения кривой подпора, в частности на обусловленное заилением перемещение зоны подпора вверх по реке. Взвешенные наносы в горных водохранилищах осаждаются сравнительно равномерно по всему бьефу и ввиду обычной для

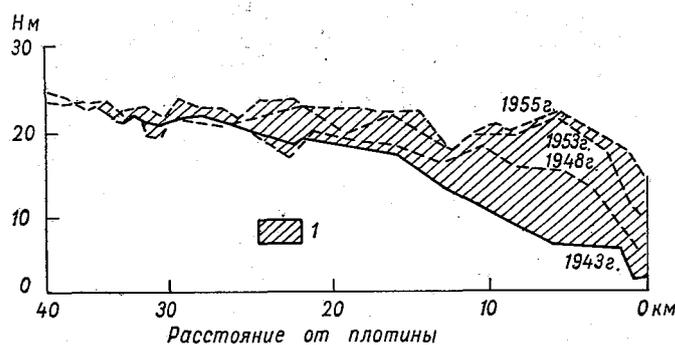


Рис. 34. Продольные профили дна Фархадского водохранилища.

1 — тело заиления.

водохранилищ такого типа малости длины часто в значительном количестве сбрасываются в нижний бьеф.

Большое влияние на формирование тела заиления оказывает режим уровней водохранилища. Сработка водохранилища, как правило, приводит к размыву верхней части тела заиления и переотложению наносов в средней и даже приплотинной частях водохранилища. Это обстоятельство используется для промывок водохранилищ, позволяющих нередко сбросить в нижний бьеф значительную часть тела заиления. На рис. 35 представлена фотография горного водохранилища во время промывки.

И. Ф. Карасев [52] на основе системного подхода предложил деление всего периода заиления водохранилища на три стадии; он руководствовался при этом следующим признаком: наличие или отсутствие обратной связи в процессе заиления и транзита наносов. Карасев выделяет следующие стадии: 1) иррегулярный режим заиления, при котором все поступающие в водохранилище наносы аккумулируются им; 2) регулярный режим заиления, характеризующийся наличием влияния тела заиления на транзит наносов; 3) стадия заключительного режима, когда поступающие в водохранилище наносы проходят транзитом.

Основным качественным различием процесса заиления в первой и второй стадиях является то, что в первой стадии обратная связь отсутствует, а во второй стадии она ярко проявляется. В третьей стадии прекращается действие характерных закономерностей процесса заиления и им на смену приходят закономерности формирования русла в аллювиальных отложениях в условиях транзита наносов.

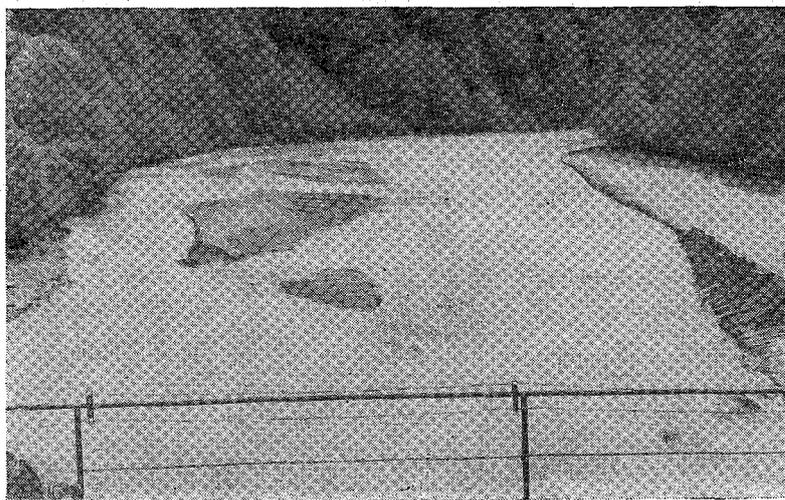


Рис. 35. Промывка горного водохранилища.

Переход от первой стадии ко второй, как показал ранее Б. А. Скрыльников [151], осуществляется при снижении объема водохранилища W до следующей величины:

$$W_0 \approx 8,3\omega_p, \quad (6.9)$$

где ω_p — объем устойчивого русла в пределах от начального створа водохранилища до плотины.

Первая стадия заиления может иметь место в тех водохранилищах, объемы которых удовлетворяют неравенству

$$W > 8,3\omega_p. \quad (6.10)$$

Определения стадий заиления, даваемые Карасевым, полезно несколько уточнить. Так, при характеристике первой стадии следует учитывать, что отсутствие обратной связи может иметь место и при частичном транзите наносов (обычно наиболее мелких) через водохранилище. Это может наблюдаться при усло-

ви $W > 8,3w_p$; например, тогда, когда длина водохранилища сравнительно невелика и фактический расход наносов не приходит в полное соответствие с транспортирующей способностью транзитного потока, что приводит к сбросу части наносов в нижний бьеф. Таким образом, условие полного поглощения водохранилищем стока наносов не является достаточно общей характеристикой первой стадии. Главным здесь является (что отмечает и Карасев) отсутствие обратного влияния заиления на транзит наносов. Это и должно служить определением первой стадии.

Переход от первой стадии ко второй более надежно, чем по критерию Скрыльникова, по-видимому, мог бы быть установлен на основании оценки изменения транспортирующей способности транзитного потока в водохранилище. К сожалению, в настоящее время для подобной разработки не имеется достаточного исходного материала, поэтому пока приходится довольствоваться эмпирическим соотношением Скрыльникова.

Для второй стадии характерен экспоненциальный закон убывания во времени интенсивности заиления. Этот закон приблизительно описывается известными формулами Ф. Орта, Г. И. Шамова, В. С. Лапшенкова [83] и др.

Переход к третьей стадии четко выражается соответствием между поступлением наносов в водохранилище и их сбросом в нижний бьеф. По показателю транспортирующей способности потока можно этот переход определить как

$$P_{S\text{вод}} = P_S, \quad (6.11)$$

где $P_{S\text{вод}}$ — транспортирующая способность водохранилища (у створа плотины); P_S — транспортирующая способность реки выше подпора, т. е. в бытовых условиях.

Заметим, что третью стадию, по-видимому, следовало бы называть русловой стадией водохранилища.

Теперь остановимся еще на одном важном вопросе, не затронутом выше, а именно на вопросе о так называемых тяжелых потоках, которые в отдельных случаях формируются в водохранилищах, созданных на реках, транспортирующих очень большое количество весьма мелких фракций наносов. Мелкие фракции долгое время удерживаются в речных водах, которые в виде донных плотностных течений, сохраняющих часто монолитный характер, перемещаются к плотине, способствуют выносу части наносов в нижний бьеф и существенно влияют на распределение отложений в водохранилище. Методика расчета тяжелых потоков разработана весьма слабо и имеет ряд условностей. Способа оценки возможного выноса мелких наносов тяжелыми потоками в нижний бьеф в настоящее время не имеется, поэтому условия формирования и транзита в водоемах тяжелых потоков здесь не рассматриваются.

6.2. Методы расчета общего заиления водохранилищ и прудов

Задачами расчета общего заиления водоемов являются: 1) оценка срока службы водохранилища как емкости, регулирующей сток; 2) получение объема заиления и регулирующей емкости водоема через заданное число лет. Для решения этих задач, как указывалось выше, предложен ряд методов расчета, не предполагающих какое-либо деление водоемов на части, а рассматривающих их целиком. Поэтому такие методы отличаются сравнительной простотой и именуются упрощенными методами, в отличие от детальных — иногда весьма сложных.

Прежде чем изложить сущность упрощенных методов, оценим их с точки зрения системного подхода к процессу заиления водоемов. Отметим в первую очередь, что большая часть этих методов основана на использовании экспоненциальной функции затухания заиления и поэтому описывают только вторую стадию заиления. Здесь прежде всего должны быть упомянуты методы Ф. Орта и Г. И. Шамова, В. С. Лапшенкова, формула Н. А. Картвелишвили [67].

Содержащиеся в некоторых расчетных формулах (Шамова, Лапшенкова) параметры, учитывающие русловую емкость W_p , при которой все поступающие в водохранилище наносы проходят его транзитом, позволяют при расчете заиления входить из второй стадии заиления в третью — русловую стадию, когда водохранилище уже перестает выполнять свою основную функцию — регулировать речной сток. Как видим, недостатком упомянутых методов является неучет особенности процесса на первой его стадии, когда нарастание тела заиления идет по линейному закону. В тех случаях, однако, когда первоначальная емкость водоема такова, что заиление начинается непосредственно со второй стадии, применение этих методов является корректным для всего диапазона.

Что касается детальных методов расчета заиления водохранилищ, разработанных А. В. Караушевым, К. И. Россинским и И. А. Кузьминым, то они описывают процесс во всех его стадиях и поэтому не нуждаются в системном рассмотрении процесса заиления.

И. Ф. Карасев, используя системный подход, на основе соотношения Б. А. Скрыльникова, регламентирующего переход от первой стадии заиления ко второй, и условно принимая полное отсутствие выноса наносов в нижний бьеф, получил следующее приближенное выражение для оценки продолжительности первой стадии заиления:

$$t_1 = \frac{W - 8,3w_p}{V_s}, \quad (6.12)$$

где V_s — объемное выражение годового стока наносов, получен-

ное при учете плотности донных отложений $\rho_{отл}$ из соотношения (6.6), м³/год. Время t_1 получается в годах.

Для всей первой стадии расчет заиления выполняется на основе условия равенства годовой массы аккумуляции наносов в водоеме Π_a годовому стоку наносов Π_s (кг/год). Масса тела заиления Π_{at} к концу t -того года эксплуатации водохранилища, выраженная в килограммах, находится как произведение $\Pi_{at} = \Pi_s t$, где Π_s — среднее многолетнее значение годового стока наносов. Переход к объему тела заиления W_{at} производится при учете плотности отложений в водоеме. В процессе вычислений выполняются контрольные подсчеты условий транзита наносов через водохранилище, объем которого уменьшился на W_{at} . При получении ощутимого выноса наносов в нижний бьеф считают, что первая стадия заиления окончена и продолжают расчет методом, отвечающим условиям второй стадии.

Продолжительность второй стадии заиления и ход заиления водохранилищ и прудов по годам могут быть приближенно оценены методом, разработанным Г. И. Шамовым [168, 170], использующим экспоненциальную зависимость затухания заиления, полученную Ф. Ортом. Зависимость Орта может быть представлена в виде

$$W_t = W_{a. пред} a^t, \quad (6.13)$$

где W_t — оставшийся незаиленным к концу t -того года объем водохранилища; $W_{a. пред}$ — предельно возможный объем заиления; a — постоянный для данного водохранилища коэффициент.

Основная расчетная формула Шамова имеет вид

$$W_{at} = W_{a. пред} \left[1 - \left(1 - \frac{W_{a1}}{W_{a. пред}} \right)^t \right], \quad (6.14)$$

где W_{at} — объем тела заиления через t лет, м³; W_{a1} — объем отложений взвешенных и влекомых наносов (м³) за первый год эксплуатации водохранилища (если с самого начала заиление происходит по схеме второй стадии) или же годовой объем отложений в последний год первой стадии заиления водохранилища; $W_{a. пред}$ — предельно возможный объем отложений наносов в водохранилище, м³.

Нетрудно убедиться в том, что для конца первого расчетного года ($t=1$) по формуле Шамова получается $W_{at} = W_{a1}$, а для второго и последующих лет значения годовой аккумуляции постепенно снижаются, что характерно только для второй стадии заиления.

Для приближенной оценки заиления допускается вычисление величин W_{at} и $W_{a. пред}$ по следующим формулам:

$$W_{a1} = \frac{1}{\rho_{отл}} \Pi_s \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_n} \right)^n \right], \quad (6.15)$$

$$W_{a. пред} = W \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_n} \right)^m \right], \quad (6.16)$$

где P_s — расчетный годовой сток наносов, кг/год; $\rho_{отл}$ — плотность отложений, кг/м³; W — полный объем водохранилища после завершения первой стадии процесса заиления, м³; $\omega_{п}$ — наибольшая площадь поперечного сечения верхнего бьефа на ближайшем к плотине участке, м²; ω_p — площадь поперечного сечения реки в бытовых условиях при расходе воды, равном $3/4$ расчетного максимального расхода, м²; $m = 1,7$; n — показатель степени, принимаемый в зависимости от уклона реки I (при $I > 0,0001$ $n = 1,0 \div 0,8$; при $I = 0,0001 \div 0,001$ $n = 0,8 \div 0,5$; при $I = 0,001 \div 0,01$ $n = 0,50 \div 0,33$).

Более надежный результат метод Шамова дает тогда, когда заиление за первый год эксплуатации водохранилища (W_{a1}) вычисляется не по формуле (6.15), а детальными способами с разбивкой водохранилища на участки (Караушев, Россинский и Кузьмин). Этот способ рассматривается ниже.

Остановимся на методе В. С. Лапшенкова, в котором применяются две основные расчетные зависимости, используемые при различных скоростях течения в водохранилище. Этот метод, как указывалось, описывает вторую стадию заиления и позволяет выходить в третью стадию, когда процесс заиления практически прекращается. Расчетные формулы Лапшенкова содержат некоторые величины, получаемые по данным непосредственных измерений на водохранилище (если это водохранилище уже существует) или же по предлагаемым им эмпирическим формулам. Метод Лапшенкова детально рассмотрен в «Указаниях по расчету заиления водохранилищ» [159].

В 1966 г. в ГГИ А. В. Караушевым разработан теоретический метод расчета заиления малых водохранилищ и прудов. Метод основан на уравнении продольного распределения мутности водных масс в водоеме и составлении баланса наносов. В принципе полученное им уравнение годового заиления водоема применимо и для приближенного расчета аккумуляции наносов в крупных водохранилищах. Оно работает как в первой, так и во второй стадии процесса заиления, а при переходе к третьей стадии показывает прекращение дальнейшей аккумуляции наносов, т. е. физически правильно отражает действительный процесс на всех стадиях заиления.

Расчетная формула Караушева имеет вид

$$\tilde{P}_a = 1 - (1 - \tilde{W}) e^{-\frac{\varphi \tilde{W}}{1 - \tilde{W}}}, \quad (6.17)$$

где \tilde{P}_a — относительная наносоудерживающая способность водоема, получаемая для каждого расчетного года; величина \tilde{W} выражает относительную емкость водоема также для расчетного года. По найденной величине определяется годовая аккумуляция наносов.

муляция Π_a по формуле (6.8). В процессе заиления \tilde{W} уменьшается на объем годовой аккумуляции, что и учитывается при выполнении расчетов.

Параметр φ , содержащийся в показателе степени уравнения, определяется зависимостью

$$\varphi = \frac{u T_c}{H_b}, \quad (6.18)$$

в которой u — гидравлическая крупность наносов, м/с; H_b — средняя глубина водоема, уменьшающаяся в процессе заиления, метры; T_c — продолжительность периода сброса из водоема в нижний бьеф паводочных вод, измеряемая в секундах (с); слабый сток после прохождения паводка не учитывается, поскольку он практически не может осуществлять вынос наносов из водоема.

В процессе заиления параметр φ возрастает; изменяется одновременно и показатель степени уравнения (6.17), зависящий от φ и \tilde{W} . Для разных водоемов значения φ различны и изменяются в широких пределах: по имеющимся в нашем распоряжении данным — от 0,1 до 40,0 и даже более. При постоянном значении $\varphi \approx 30$ уравнение (6.17) хорошо согласуется с известным эмпирическим графиком Брена.

Расчет заиления водохранилищ и прудов может быть уточнен, если все вычисления делать не суммарно для всех транспортируемых наносов, а по отдельным фракциям. Так, для i -той фракции наносов, имеющей гидравлическую крупность u_i , записывается следующее уравнение аккумуляции:

$$\tilde{\Pi}_{ai} = 1 - \left(1 - \tilde{W}\right) e^{-\frac{\varphi_i \tilde{W}}{1 - \tilde{W}}}, \quad (6.19)$$

в котором

$$\varphi_i = \frac{u_i T_c}{H_b}. \quad (6.20)$$

Формула (6.19) применима в том случае, если имеются данные о гранулометрическом составе транспортируемых потоком наносов, т. е. процентном содержании $\alpha_{срi}$ каждой переносимой фракции. В этом случае сток наносов частной фракции находится из соотношения

$$\Pi_{si} = \frac{\alpha_{срi}}{100} \Pi_s. \quad (6.21)$$

Аккумуляция наносов в водоеме находится как суммарная масса (суммарный объем) отложений всех фракций наносов.

Расчеты заиления малых водохранилищ и прудов рассмотренным здесь методом выполняются без особых затруднений.

Предварительно можно построить серию кривых $\tilde{P}_a(\tilde{W})$ для ряда значений φ . При отсутствии надлежащих исходных данных для непосредственного вычисления φ по формуле (6.18) эта величина может быть определена по разрешенному относительно φ уравнению (6.17) по данным о заилении прудов-аналогов, расположенных в тех же природных условиях, что и рассматриваемый водоем. Данные по аналогам используются для построения эмпирической зависимости $\varphi(\tilde{W})$, поскольку, как указывалось, φ возрастает с уменьшением \tilde{W} .

6.3. Детальный расчет заиления водохранилищ

Детальные методы расчета заиления водохранилищ применяются при решении наиболее ответственных инженерных и водохозяйственных задач. Эти методы позволяют не только более надежно и с достаточной подробностью выполнить расчеты срока службы водохранилища, оценивать объемы аккумулятивных отложений (что более грубо рассчитывается и упрощенными методами), но и решать ряд других весьма сложных инженерных задач. В частности, появляется возможность получить распределение отложений по длине водохранилища, включая зону выклинивания подпора, исследовать трансформацию кривой подпора, обусловленную заилением водохранилища, изучать смещение тела заиления и т. д.

Остановимся на изложении детального метода расчета заиления водохранилищ, разработанного в ГГИ А. В. Караушевым [59]. В основе метода лежит баланс наносов водохранилища в целом или же его участков. Оценивают приход и расход наносов соответственно через начальный и конечный створы и по разности между этими величинами получают заиление водоема между указанными створами.

Приход наносов в водохранилище через его начальный створ оценивается по данным о стоке наносов реки, питающей водохранилище, с учетом его внутригодовой и многолетней изменчивости и гранулометрического состава поступающих в водохранилище наносов. Определение расходной статьи баланса основано на уравнении, учитывающем изменения транспорта наносов по длине водохранилища. Полученный сток наносов в конечном створе выражает количество сбросов наносов в нижний бьеф. Метод позволяет учитывать поступление наносов из боковых притоков водохранилища.

В зависимости от поставленной задачи и размера водохранилища расчет заиления выполняется для водоема в целом или по участкам, на которые делится водохранилище поперечными сечениями.

Характер изменения транспорта наносов по длине водохранилища определяется крупностью транспортируемых наносов, изменениями глубины, скорости течения и грунтов по длине водохранилища. Расчет заиления производится по отдельным фракциям транспортируемых наносов с выделением в особую группу фракций, относящихся к собственно влекомым наносам.

Данные об изменении гидравлических элементов потока (глубины, скорости и др.) по длине водохранилища при проектировании последнего могут быть получены только на основании гидравлических расчетов, учитывающих, помимо морфометрических характеристик водохранилища, внутригодовую изменчивость стока воды в начальном створе, регулирующее влияние водохранилища, процесс его наполнения и опорожнения, а также многолетнюю изменчивость стока воды.

Оценка изменения транспорта наносов по длине водохранилища производится по экспоненциальному уравнению, определяющему мутность потока в конечном створе (всего водохранилища или его части) в зависимости от мутности в начальном створе и от среднего значения транспортирующей способности потока соответствующей части водохранилища. Эти вычисления ведутся для заданного состава наносов и заданных значений гидравлических элементов потока. Из сказанного видно, что расчет заиления водохранилища должен включать гидравлические расчеты и определения транспортирующей способности потока.

Расчет для одного года состоит из нескольких этапов: 1) получение и подготовка исходных данных (сток воды и наносов, их внутригодовое распределение и изменчивость, гранулометрия транспортируемых наносов и донных отложений, топографические данные, характеризующие чашу водохранилища); 2) назначение расчетных интервалов времени при учете режима стока воды и наносов и уровней воды в водохранилище; 3) выделение расчетных участков; 4) гидравлические расчеты для водохранилища в целом или по участкам при разных уровнях и расходах воды, отвечающих средним значениям для назначенных расчетных интервалов времени; эти расчеты включают построение кривых свободной поверхности и вычисление средних скоростей течения; 5) расчет транспортирующей способности потока (суммарной и по фракциям); 6) получение расходов наносов (суммарно или по фракциям) на концах расчетных участков; 7) получение на основе баланса наносов значений заиления для расчетных интервалов времени всего водохранилища или по участкам (с пересчетом от заиления, выраженного в единицах массы, к объему заиления); 8) получение значений годового заиления на участках по всем фракциям отложившихся наносов, в том числе и влекомых наносов.

Расчет заиления для последующих лет, как указывалось, может выполняться таким же образом, как и для первого года,

но с учетом изменения глубины, обусловленного заилением, получаемым по расчету за предыдущие годы.

При выполнении приближенных расчетов некоторые особенности режима стока воды и наносов не учитываются, в частности в расчете используется только норма стока наносов, многолетняя же его изменчивость не учитывается.

Расчет осаждения взвешенных наносов в водохранилище выполняется при использовании следующей, детально рассмотренной в данной книге теоретической формулы транспортирующей способности потока:

$$S_{\text{тр}} = \Gamma S_{\text{взм}}, \quad (6.22)$$

где Γ — гидромеханический параметр наносов; $S_{\text{взм}}$ — мутность взмыва, кг/м^3 .

Гидромеханический параметр наносов при расчете заиления удобно определять по составу донных отложений по формуле

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{\text{взм}i}}{100} \Gamma_i, \quad (6.23)$$

причем сумма берется по всем (m) взвешиваемым фракциям донных отложений; Γ_i — частное значение гидромеханического параметра наносов, которое может быть получено для i -той фракции по графикам и таблицам, приведенным в главе 3, где подробно изложена методика расчета транспортирующей способности потока.

При детальном расчете заиления водохранилищ представляется необходимой оценка транспортирующей способности потока в отношении отдельных фракций. Так, для i -той фракции средняя частная мутность, отвечающая транспортирующей способности потока, выражается равенством

$$s_{i\text{тр}} = \frac{\alpha_{i\text{взм}}}{100} \Gamma_i S_{\text{взм}}. \quad (6.24)$$

Расход взвешенных наносов на участках водохранилища вычисляется как произведение $S_{\text{тр}}$ или $s_{i\text{тр}}$ на расход воды Q $\text{м}^3/\text{с}$; $S_{\text{взм}}$ определяется по формуле, дающей эту величину в кг/м^3 .

Расчет транспорта наносов, перемещаемых в придонном слое потока, т. е. расчет расхода влекомых наносов, выполняется по формулам, рекомендуемым в главе 4. Как правило, вычисления показывают осаждение всех влекомых наносов уже на первом расчетном участке (в зоне выклинивания подпора), что облегчает дальнейшие расчеты.

При выполнении расчета заиления водохранилищ в расчетные формулы транспорта наносов вводится поправочный множитель a , приводящий формулу для начального створа в соответствие с данными измерений стока наносов. Этот множитель сохраняется и для последующих створов. При отсутствии данных

о стоке наносов расчет выполняется по формулам без поправочного множителя.

Детальный расчет заиления водохранилища производят по отдельным участкам, на которые водохранилище делится поперечными сечениями. Начальный створ верхнего расчетного участка совпадает с началом зоны подпора водохранилища, а конечный (последнего участка) совпадает с плотиной. Каждый промежуточный створ является одновременно начальным для расположенного ниже расчетного участка и конечным для вышерасположенного участка.

Введем обозначения: Δt_j — расчетный интервал времени в секундах (с); $P_{s_{начj}}$ — сток наносов i -той фракции в килограммах через начальный створ участка за j -тый расчетный интервал; $P_{s_{конj}}$ — то же, через конечный створ участка; $P_{s_{iaj}}$ — масса наносов i -той фракции в килограммах, аккумулирующихся в водохранилище за время Δt_j .

Для первого расчетного участка величина $P_{s_{начj}}$ находится по данным о стоке наносов с учетом его внутригодового распределения и гранулометрического состава транспортируемых наносов. При отсутствии таких данных, как указывалось, используются косвенные методы оценки стока наносов (см., например, в «Указаниях по расчету стока наносов» ВСН 01-73).

Отложение (аккумуляция) наносов i -той фракции $P_{s_{iaj}}$ на участке водохранилища за интервал Δt_j определяется по следующему уравнению баланса:

$$P_{s_{iaj}} = P_{s_{начj}} - P_{s_{конj}}, \quad (6.25)$$

или

$$P_{s_{iaj}} = (P_{s_{начj}} - P_{s_{конj}}) \Delta t_j, \quad (6.26)$$

где P_{si} — соответствующие частные расходы взвешенных наносов (i -той фракции) в кг/с.

Аналогичное соотношение записывается и для влекомых наносов, т. е.

$$P_{вл. aj} = P_{вл. начj} - P_{вл. конj}, \quad (6.27)$$

или

$$P_{вл. aj} = (P_{вл. начj} - P_{вл. конj}) \Delta t_j, \quad (6.28)$$

где $P_{вл}$ — значения расходов влекомых наносов в кг/с.

Сток взвешенных наносов i -той фракции в конечном створе за интервал Δt_j находится по формуле

$$P_{s_{конj}} = s_{конj} Q_{ср. конj} \Delta t_j. \quad (6.29)$$

Здесь $Q_{ср. конj}$ — средний за интервал расход воды в конечном створе; $s_{конj}$ — средняя для интервала частная мутность в конечном створе.

Для определения $s_{\text{икон}}$ используется упоминавшаяся выше формула Караушева

$$s_{\text{икон}j} = s_{\text{итр}j} + (s_{\text{нач}j} - s_{\text{итр}j}) e^{-G_{i*j} \Delta \tilde{x}}, \quad (6.30)$$

где $\Delta \tilde{x}$ — относительная длина расчетного участка, находящаяся из соотношения

$$\Delta \tilde{x} = \frac{\Delta x}{H_{\text{ср}}}, \quad (6.31)$$

где Δx — длина участка в метрах; $H_{\text{ср}}$ — средняя глубина водоема на участке в метрах.

Безразмерный параметр G_{i*j} вычисляется для j -того интервала по формуле

$$G_{i*j} = \frac{u_i + k_{ij}}{v_{\text{ср}j}}, \quad (6.32)$$

где $v_{\text{ср}j}$ — средняя скорость течения на участке в j -тый интервал времени; u_i — гидравлическая крупность наносов i -той фракции; параметр k_{ij} находится по формуле

$$k_{ij} = \frac{u_i \Gamma_{ij}}{1 - \Gamma_{ij}}. \quad (6.33)$$

Общая масса отложений (аккумуляции) на рассматриваемом участке водохранилища за время Δt_j будет равна сумме отложений всех m фракций взвешенных наносов и отложений влкомых наносов, т. е.

$$П_{\text{са}j} = \sum_{i=1}^m П_{\text{си}aj} + П_{\text{вл. а}j}. \quad (6.34)$$

Объем отложений на участке за время Δt_j будет

$$W_{aj} = \frac{П_{\text{са}j}}{\rho_{\text{отл}}}. \quad (6.35)$$

Годовое заиление на участке определяется как сумма объемов заиления за все расчетные интервалы Δt_j .

Год от года происходит накопление отложений. Если за счет аккумуляции наносов на участке средняя глубина уменьшается на $1/4 - 1/5$ начальной глубины, то прежде чем перейти к расчетам заиления для последующего отрезка времени, необходимо повторить все гидравлические расчеты, используя новые значения глубин на расчетных участках. Это позволяет учесть обратное влияние заиления на транспорт наносов и на дальнейшую аккумуляцию наносов в водоеме. Подобные пересчеты гидравлических элементов потока необходимо производить при каждом новом уменьшении глубины на указанную выше величину.

Расчеты рассмотренным методом дают ряд последовательных положений профиля дна водоема и кривой подпора, что и является главной задачей вычислений.

Для получения общих объемов заиления всего водохранилища и хода его заиления по годам суммируют объемы заиления по всем расчетным участкам за каждый год и строят хронологический график нарастания тела заиления или же график потери емкости водохранилища в виде $W(t)$, где t — число лет.

В случае если процесс заиления находится в первой стадии, объем заиления для t -того года с начала эксплуатации водохранилища определяется простым умножением объема заиления за первый год на число лет t . При переходе ко второй стадии заиления, что выясняется приближенно по критерию Скрыльникова или более надежно путем пробных расчетов заиления детальным методом, расчет ведется либо детальным методом от года к году, как было сказано выше, либо применяется метод Шамова или Лапшенкова. При этом за первый расчетный год принимают тот год, когда водоем в результате заиления переходит из первой стадии во вторую. Соответственно все начальные гидравлические и морфометрические параметры водоема вычисляют для условий того же года, ведя от него также и отсчет времени.

Для детального расчета заиления водохранилищ может применяться метод К. И. Россинского и И. А. Кузьмина, разработанный ими в Гидропроекте при участии других сотрудников. Этот метод также основан на балансе наносов, но во многом отличается от метода, разработанного в ГГИ. Во-первых, его авторы принимают, что на каждом расчетном участке водохранилища фактический расход наносов устанавливается в соответствии с транспортирующей способностью потока, т. е. не учитывается тот пространственный сдвиг значений мутности, который обусловлен определенной «инерционностью» процессов выпадения наносов и взмучивания, учитываемых формулой Караушева. Во-вторых, вместо теоретической формулы транспортирующей способности применяются графики связи содержания в потоке так называемых руслоформирующих и отдельно неруслоформирующих (мелких) фракций с некоторым параметром β . Параметр β выражается зависимостью

$$\beta = \frac{v_{\text{ср}}^3}{uH_{\text{ср}}}, \quad (6.36)$$

где $v_{\text{ср}}$ и $H_{\text{ср}}$ при построении графиков рассматриваются соответственно как средние значения скорости и глубины в створе измерения стока наносов; u — средняя гидравлическая крупность руслоформирующих или мелких фракций. При расчете заиления $v_{\text{ср}}$ и $H_{\text{ср}}$ берутся как средние для расчетных участков.

Руслоформирующие фракции в составе взвешенных наносов выделяются по следующему признаку: за наименьший размер этих фракций принимается диаметр частиц, мельче которых в составе донных отложений содержится не более 5—8% (по массе).

На каждом из вышеприведенных графиков $S = f(\beta)$ проводятся две огибающие линии — верхняя и нижняя. Верхняя, по мнению Россинского и Кузьмина, должна отвечать предельному насыщению потока наносами в зонах их отложения, а вторая — нижняя — характеризует транспортирующую способность потока в зонах размыва. Промежуток между кривыми отвечает транзиту наносов.

Россинский и Кузьмин считают, что при отсутствии достаточного натурального материала на рассматриваемой реке можно пользоваться графиками, построенными ими по материалам, относящимся к различным рекам.

При выполнении расчетов заиления детальными методами (ГГИ и Гидропроекта) целесообразно учитывать многолетнюю изменчивость годового стока наносов.

Изменчивость годового стока наносов учитывается при расчетах заиления в случаях, когда показатель условной заиляемости $t_y < 50$ лет. При $t_y > 50$ лет расчет заиления производится только по норме стока наносов [159].

Влияние многолетней изменчивости стока наносов на интенсивность заиления водохранилища оценивается путем дополнительных контрольных расчетов: а) по ряду наблюдаемых или вычисленных значений стока наносов, расположенных в хронологическом порядке; б) по стоку наносов малой вероятности превышения для группировок лет различной продолжительности.

Второй способ предпочтительнее, так как он дает возможность оценить вероятность ускоренного заиления водохранилища при прохождении в первые годы его эксплуатации групп лет с повышенным стоком наносов.

Суммарный (за n -летние периоды) сток взвешенных наносов различной вероятности превышения определяется по аналитическим кривым обеспеченности.