

Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР
СРЕДНЕАЗИАТСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИРРИГАЦИИ ИМЕНИ В.Д.ЖУРИНА (САНИИРИ)

УДК 626.821.3:627.8.03.7

На правах рукописи

СКРЫЛЬНИКОВ ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ЭЛЕМЕНТОВ И РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ
МАГИСТРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ
ОТКРЫТЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Специальности:

06.01.02 - "Мелиорация и орошаемое земледелие"
05.14.09 - "Гидравлика и инженерная гидрология"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной
степени доктора технических наук

ТАШКЕНТ - 1987

Работа выполнена в Среднеазиатском ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте ирригации имени В.Д.Журина (САНИИРИ)

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор А.А.Рачинский,
доктор технических наук, профессор В.С.Алтуни,
доктор технических наук, профессор Д.В.Штеренлихт

Ведущее предприятие - ГрузНИИГИМ

Защита диссертации состоится "17" сентября 1987 г.
в 10⁰⁰ часов на заседании специализированного совета
Д.099.02.01 по защите диссертаций при Среднеазиатском
научно-исследовательском институте ирригации им.В.Д.Журина.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САНИИРИ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный
подписями и гербовой печатью, просим присылать по
адресу: 700187, Ташкент-187, массив Карасу 4, д.11,
Учёному секретарю специализированного совета.

Автореферат разослан "11" августа 1987 г.

Учёный секретарь
специализированного совета
доктор биологических
наук

К.П.ПАГАНЯС

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Принятые на XXII съезде КПСС "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" в качестве одной из важнейших задач развития агропромышленного комплекса и реализации продовольственной программы выделяют долгосрочную программу мелиорации земель.

За годы XII пятилетки предусматривается ввести в эксплуатацию 3,3 млн га орошаемых и 3,6 млн га осушенных земель, выполнить культуртехнические работы на площади 8,3 млн га, улучшить техническое состояние действующих оросительных систем на площади 5,6 млн га. Комплексно решать вопросы мелиорации земель и их сельскохозяйственного освоения. Повысить эффективность использования орошаемых и осушенных земель.

В республиках Средней Азии на XII пятилетку намечается увеличить площадь орошаемых земель на 656 тыс. га, в том числе по УзССР - 410 тыс га, Кирг.ССР - 85 тыс га, Тадж. ССР - 55 тыс га, Туркмен.ССР - 106 тыс га. Площадь орошаемых земель в среднеазиатском регионе согласно долгосрочной программы развития мелиорации земель до 2000 года должна быть доведена до 9,0 млн га, в том числе по УзССР - до 5,5 млн га, Кирг.ССР - 1,2 млн га, Тадж.ССР - 0,9 млн га, Туркмен.ССР - 1,4 млн га.

Выполнение поставленных задач непосредственно связано с реконструкцией существующих и строительством новых открытых оросительных систем, элементы которых и режим их эксплуатации должны назначаться с учетом нормативного срока службы, наименьших капитальных и эксплуатационных затрат и повышения надежности их работы, т.е. отвечать требованиям совершенных оросительных систем.

По А.Н.Костикову открытая оросительная система включает в себя следующие основные части: источник орошения (река, водохранилище, озеро и т.п.), головное сооружение, магистральный и распределительные каналы, временную оросительную сеть, водотоводящую сеть и различные сооружения на всех каналах.

Комплекс таких частей системы как источник орошения, магистральный канал и распределительная сеть целесообразно именовать элементами магистрального питания.

В зависимости от геоморфологических условий района оро-

сительные системы подразделяются на предгорные оросительные системы, оросительные системы речных долин, оросительные системы водораздельных равнин и плато.

В зависимости от типа водозабора различают бесплотинные и приплотинные оросительные системы.

Режим работы оросительных систем по А.Н.Костякову представляет собой динамику расходов магистрального и распределительных каналов, которая устанавливается в результате сочетания во времени плановых режимов орошения земель. Но для всех элементов магистрального питания необходим комплекс мероприятий и условий работы, т.е. такой режим эксплуатации, который позволит максимально соблюдать режим орошения предусматриваемый планами водопользования.

Срок службы с гарантированным режимом водоподдачи приплотинных оросительных систем определяется продолжительностью процессов заиления и занесения, протекающих в водохранилищах.

Отложение наносов в верхнем бьефе на определенном этапе заиления настолько сокращает полезную регулируемую емкость водохранилища, что вызывает нарушение запланированного режима работы водосточника и ухудшает режим работы оросительной системы вследствие нарушения водообеспеченности орошаемых ее земель.

Занесение верхних бьефов низконапорных гидроузлов ухудшает условия безнасосного водозабора, в каналы поступают донные наносы в количестве превышающем транспортирующую способность потока, что вызывает завал головных участков каналов и уменьшение их пропускной способности.

В процессе заиления и занесения увеличивается длина кривой подпора, изменяются отметки уровней воды в зоне первоначального подпора, что увеличивает площади затопления и подтопления и ухудшает мелиоративное состояние прибрежной территории.

Осветленный поток, освобожденный от наносов поступающий в нижний бьеф гидроузла вызывает размыв речного русла на большой длине, что приводит к понижению уровней воды вызывающим существенные затруднения в обеспечении планового забора воды головными сооружениями нижележащих бесплотинных оросительных систем.

Крупные мелиоративные каналы с динамической устойчивостью,

особенно которые проходят в несвязных грунтах, при поступлении в них осветленной воды из построенного водохранилища могут подвергнуться существенным деформациям и прежде всего понижению дна вследствие размыва, что значительно ухудшает условия их командования над отводами, а, следовательно, нарушает водообеспеченность орошаемых ими земель. Кроме того, размыв русла может сопровождаться подмывом различных линейных сооружений (особенно перепадов) расположенных на каналах.

В настоящее время оросительные каналы и каналы коллекторно-дренажной сети проектируются и строятся без достаточно систематизированного подхода к выбору элементов учитывающих виды устойчивости их русла, определяющих тот или иной режим эксплуатации. Это приводит к тому, что поток в канале начинает блуждать, вызывая русловые деформации, способные привести к снижению пропускной способности нарушающей плановый режим водоподдачи. Для восстановления нормальной работы таких каналов, осуществляемые эксплуатационные мероприятия требуют больших затрат механизмов, материалов и денежных средств на протяжении длительного периода, пока неустойчивый режим эксплуатации не становится более устойчивым. Поэтому при проектировании, реконструкции и эксплуатации систем необходимо производить расчеты оптимальных элементов магистрального питания в достаточно полной увязке с режимами эксплуатации, что обеспечит их высокую надежность с наименьшими эксплуатационными затратами. Методы расчета оросительных каналов можно распространить на каналы коллекторной сети, так как режим их эксплуатации во многом подобен режиму эксплуатации оросительных каналов.

В связи с вышеизложенным уточнение существующих и разработка новых методов расчета элементов магистрального питания оросительных систем, а также режимов их эксплуатации, позволяющих создать более совершенные и надежные мелиоративные системы, имеет большое научное и практическое значение.

Цель работы: выявление характерных особенностей и составление классификации режимов эксплуатации оросительных систем, установление взаимосвязи их элементов с режимом эксплуатации и разработка мероприятий и методов расчета, повышающих эффективность эксплуатации и надежность работы открытых оросительных систем.

Задачи исследований предусматривают разработку:

- методики расчета наносодерживающей способности водохранилищ в зависимости от режимов их эксплуатации и определения срока их службы для равнинной и предгорной зоны;
- рекомендаций по построению кривых подпора и определению размеров зон затопления в верхнем бьефе гидроузла, изменяющихся в процессе заиливания и занесения бьефа;
- способов увеличения срока службы водохранилищ и борьбы с непроизводительными потерями стока воды в процессе их эксплуатации;
- метода расчета уровня режима в оросительных каналах и в речном русле нижнего бьефа гидроузлов в зависимости от режима эксплуатации водохранилища;
- метода расчета оптимальных элементов оросительных каналов и каналов коллекторно-дренажной сети в увязке с режимами их эксплуатации;
- методики исследований условий эксплуатации каналов в лабораторных условиях.

Методика исследований. Наносодерживающая способность водохранилищ и режимы эксплуатации оросительных каналов выявлялись по натурным данным, приведенным в опубликованной литературе, а также по материалам, полученным автором в результате выполнявшихся им натурных и специальных лабораторных исследований заиливания бьефов и формирования каналов с различными режимами эксплуатации. При обработке собранных данных принималась математическая модель с замкнутой системой уравнений, решение которой позволило получить расчетные зависимости общего вида, уточнявшиеся и конкретизировавшиеся в соответствии с имеющимися натурными и лабораторными данными.

При измерении скоростного поля в лабораторных условиях применялись микровертушки. Измерение поперечных и продольных профилей в натурных условиях при исследовании водохранилищ и оросительных каналов производилось эхолотом "Кубань". При составлении примеров расчетов по предлагаемым методам вычисления производились на ЭВМ ЕС-1035.

Объекты исследований. Натурные исследования наносодерживающей способности верхнего бьефа и общего размыва в нижнем бьефе плотин производились на Хишрауском, Кайраккумском, Ферхадском и др. водохранилищах.

Натурные исследования по изучению режимов эксплуатации кана-

лов и условий их устойчивости производились на Кызылординском и Кызылкумском каналах бассейна Сырдарьи, а также на оросительных каналах Ташсака, Пахтаарна и Клычниязбая низовьев Амударьи.

Научная новизна.

- Впервые разработан метод расчета продолжительности заиливания водохранилищ с разделением процесса отложения наносов на две стадии - полное отложение наносов (первая стадия) и возрастающий вынос наносов в нижний бьеф (вторая стадия). Такое разделение процесса заиливания на стадии позволяет существенно упростить расчеты заиливания водохранилищ где возможна только первая стадия или эта стадия преобладает. При этом показано, что все существующие методы расчета заиливания, использующие уравнения показательного и экспоненциального вида, справедливы только для бьефов заиляющихся по закономерностям второй стадии.

- Предложены устройства по удалению наносных отложений со дна водохранилищ по сбросу теплой воды из поверхностного слоя с целью борьбы с испарением, которые, для своей работы используют как статический напор на гидроузле, так и эжекционный напор создающийся в результате размещения концевой части устройств в вакуумной зоне и максимальных скоростей течения в донном водовыпуске плотины.

- Разработан новый метод расчета кривых подпора в заиляющемся верхнем бьефе, позволяющий определять для заданного периода эксплуатации дополнительный подъем уровня воды за пределами первоначального положения кривой подпора и связанные с ним дополнительные площади затопления.

- Разработаны методы расчета продолжительности занесения и построения кривых свободной поверхности подпорных бьефов и водохранилищ горно-предгорной зоны при однородном и неоднородном составе наносов.

- Разработан метод прогнозирования уровня режима в оросительных каналах в зависимости от режима эксплуатации водохранилища.

- На основании анализа данных натурных исследований оросительных каналов разработана классификация режимов их эксплуатации, разделяющая их по видам устойчивости потока и русла, что позволяет сделать оценку условий работы каналов, установить причину деформаций

их русла, выявить степень устойчивости элементов каналов рассчитанных по существующим методам.

- По имеющимся данным натурных исследований каналов получены зависимости, позволяющие определять значение коэффициента шероховатости русла исходя из режима эксплуатации канала.

- Разработан принципиально новый метод расчета элементов и параметров мелиоративных каналов в зависимости от режимов их эксплуатации и различных видов грунтов, лежащих ложе каналов.

- Разработан новый метод лабораторных исследований условий эксплуатации мелиоративных каналов, в основу которого положено условие идентичности на модели и в натуре параметра устойчивости характеризующего режима эксплуатации.

Практическая ценность работы.

Предлагаемые методы расчета заиления и занесения позволяют с достаточно высокой точностью прогнозировать отложения наносов в верхних бьефах для различных вариантов наполнения водохранилища, выбирать параметры верхнего бьефа и плотины исходя из экономического срока отложения наносов, намечать этапы работ по восстановлению потерянной, вследствие заиления, емкости водохранилища и повысить эффективность использования последнего, применяя пониженный уровеньный режим эксплуатации.

Метод расчета кривых подпора позволяет определить площади дополнительного затопления прибрежной территории в процессе заиления и занесения, наметить варианты мероприятий по борьбе с этим затоплением и сокращению площадей отчуждения.

Предлагаемые устройства по борьбе с заилением и испарением дают возможность повысить эффективность использования водохранилищ за счет увеличения срока службы и уменьшения непроизводительных потерь воды.

Прогноз изменения уровеньного режима оросительных каналов в зависимости от условий работы водохранилищ позволит определить низшие отметки порогов сооружений расположенных на каналах, разработать мероприятия по обеспечению командных уровней воды в точках отводов и ослабить неблагоприятные ситуации возникающих в существующих каналах при их переключении на пропуск осветленной воды из водохранилища.

При проектировании и реконструкции оросительных каналов прогноз уровеньного режима позволит назначать наиболее экономически це-

лесообразные скорости течения и площади поперечных сечений соответствующие условию допустимых деформаций русла и снижения уровня воды.

Предложенные зависимости для определения значения коэффициента шероховатости русел каналов позволяют определять его расчетом исключая рекомендуемый литературой выбор этих значений исходя из внешних признаков каналов.

Метод расчета устойчивых сечений каналов с учетом режима эксплуатации позволит производить их проектирование или реконструкцию с наибольшей допустимой скоростью динамически устойчивого русла, принимая оптимальные значения параметра формы русла, которые полностью соответствуют устойчивой кинематической структуре потока и заданному режиму эксплуатации.

Практическое применение предлагаемых рекомендаций позволит существенно повысить эффективность эксплуатации открытых оросительных систем, что говорит о достаточно большом народнохозяйственном значении настоящей работы.

Внедрение. Результаты разработок использованы:

- Институтом ЦНИИКИВР для расчета заиления водохранилищ, включенных в справочник "Водохранилища СССР" с ежегодным экономическим эффектом 1165 тыс.руб.

- Институтом Узгипроводхоз для расчета заиления водохранилища Тендехо в Эфиопии при выборе экономически целесообразных параметров плотины и водохранилища.

- Таджикским научно-исследовательским отделом энергетики ГЛАВНИИпроекта Минэнерго СССР при расчете занесения емкости для складирования наносов в процессе разработки способа руслового гидравлического транспорта и складирования карьерных материалов для строительства Рогунской ГЭС с ежегодным экономическим эффектом 90 тыс.руб.

- Институтом Узгипроводхоз при составлении техпроекта канала Хош-Тепе в Демократической республике Афганистан с экономическим эффектом 200 тыс.руб.

- Институтом Совзгипроводхоз при составлении ТЭО крупного канала.

- Институтом Узгипроводхоз при составлении проектов реконструкции каналов Кегейли и Куванышджарме (ККАССР), а также Лесосежного Тюямунского (Хорезмская обл. УзССР) с экономическим эффектом 5092 тыс.руб.

- Ташкентским ОНУОС в технорабочем проекте реконструкции канала "Левобережный Карасу" с экономическим эффектом 210 тыс.руб.

Общий ежегодный экономический эффект от внедрения предлагаемых рекомендаций составил более 6,5 млн руб.

Апробация работы. По материалам диссертационной работы опубликовано 43 статьи, 3 методических указания. Работа рассмотрена на Ученом Совете САННИИРИ, по отдельным разделам на НТС Главного управления экспертизы Минводхоза УзССР, в институте Узгипровхоз, на координационном совещании в институте ГрузинИГИМ (1983 год) по вопросам заиления водохранилищ, на Всесоюзном совещании в г. Черкассы (1983 год) по вопросам переработки берегов, на объединенном заседании кафедр гидравлики и гидросооружений МГМИ.

Состав работы. Работа состоит из введения, 7 глав, выводов и рекомендаций изложенных на 293 стр. машинописного текста, включая 41 рисунок и 43 таблицы. Список литературы включает 198 названий, в том числе 19 зарубежных.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. Основные затруднения возникающие в процессе эксплуатации и при проектировании открытых оросительных систем

Режим работы или режим расходов открытых оросительных систем определяется планом водопользования. Поэтому каждая система имеет вполне определенные элементы и режим эксплуатации, включающий комплекс условий и мероприятий по поддержанию системы, которые должны обеспечить заданный режим работы.

Для различных частей бесплотинных и приплотинных оросительных систем, входящих в состав магистрального питания (участок реки и водохранилища как источник орошения, магистральный и распределительные каналы), должны соблюдаться соответствующие им режимы эксплуатации.

Для бесплотинных и приплотинных оросительных систем рассмотрен комплекс мероприятий и условий работы, которые необходимы для создания надежного и эффективного режима эксплуатации. Указаны затруднения возникающие при проектировании и эксплуатации открытых оросительных систем, приводится перечень вопросов необходимых для исследования.

2. Повышение эффективности эксплуатации ирригационных водохранилищ

Заиление верхних бьефов гидроузлов ухудшает режим работы водохранилищ за счет снижения их регулирующей способности. Нормальная работа ирригационных водохранилищ определяется продолжительностью процесса заиления до того момента, начиная с которого дальнейшее отложение наносов приведет к снижению водообеспеченности орошаемых земель. Для восстановления первоначальной обеспеченности следует осуществлять мероприятия по улучшению работы источника орошения, заключающиеся в реконструкции плотины или строения нового водохранилища. Но можно улучшить работу источника орошения также за счет мероприятий увеличивающих эффективность использования водохранилищ.

Повышение эксплуатации водохранилищ может быть достигнуто следующими способами:

- созданием пониженного уровня режима в половодье, увеличивающего проточность водохранилища способствующую пропуску транзитом части наносов в нижний бьеф гидроузла;
- использование стратификационных потоков для сброса части наносов в нижний бьеф;
- применением специальных устройств для удаления наносных отложений со дна водохранилищ.

Определение параметров плотины и водохранилища, а также оценка целесообразности применения пониженного уровня режима эксплуатации, могут быть произведены только при наличии простых и достаточно надежных методов расчета наносодерживающей способности и сроков заиления водохранилищ, позволяющих для любых заданных уровней и объемов верхнего бьефа выявить интенсивность задержания наносов.

2.1. Расчет заиления водохранилищ

Существует достаточно большое количество различных методов расчета заиления и занесения водохранилищ. Большой вклад в развитие теории осаждения наносов и разработку методов расчета их аккумуляции внесли С.Х.Абальянц, С.Т.Алтунин, И.А.Бузунов, М.А.Великанов, А.Н.Гостунский, В.Н.Гончаров, А.С.Зедгенидзе, А.В.Караушев,

И.И.Леви, В.С.Лапшенков, К.Ш.Латипов, Н.И.Маккаев, А.И.Мечитов, М.А.Мостков, А.С.Образовский, В.И.Полтавцев, К.И.Россинский, И.С.Румянцев, Р.К.Кроммер, Н.Б.Кереселидзе, А.А.Кузьмин, Г.И.Шамов, Х.Ш.Шапиро, И.А.Шнеер, Ф.М.Мухамеджанов и многие другие.

Несмотря на значительный объем выполненных исследований, простые и надежные зависимости, которые отражали бы непосредственно наносодерживающую способность водохранилищ, пока отсутствуют.

За рубежом некоторые исследователи характеризуют изменение наносодерживающей способности графической зависимостью от различных критериев. Тек Хэзен (США) предложил критерий $W/W_{ст}$, представляющий отношение водоема к среднемноголетнему годовому стоку воды. Броне и Аллен (США), Броин, Борланд (США) предложили критерий отношения емкости водоема к площади водосбора W/S_b .

Позже Броне использовал критерий Хэзена. Однако указанный критерий не использует характеристики наносов и их содержание в потоке и поэтому не может достаточно надежно отражать процесс заиливания.

Разработанный нами метод расчета заиливания основан на пока - занном на рис. I графике, характеризующем изменение степени осветления $\mathcal{E}$ в зависимости от отношения объема русла W_p , в котором поток транспортирует расчетное количество наносов, к начальному объему водохранилища W_H . Этот график построен по большому объему натурных и лабораторных данных.

Согласно рис. I всю область изменения $\mathcal{E}$ можно разделить на две зоны.

В первой зоне, соответствующей значениям $W_p/W_H < 0,12$ (зона А), степень осветления постоянна и практически равна $\mathcal{E} = 1,0$. Во второй зоне (Б), где $W_p/W_H > 0,12$, степень осветления, по мере увеличения W_p/W_H от 0,12 до 1,0, уменьшается от 1 до 0. Первой зоне соответствует первая стадия заиливания, охватывающая период времени, в течение которого происходит практически полное осаждение наносов в бьефе. Второй же зоне соответствует вторая стадия заиливания, в течение которой по мере заиливания верхнего бьефа степень осветления уменьшается за счет увеличивающегося выноса взвешенных наносов в нижний бьеф. Показателем или критерием перехода от первой стадии ко второй отношение $W_p/W_H = 0,12$ (рис. I). Согласно этому критерию, если начальная

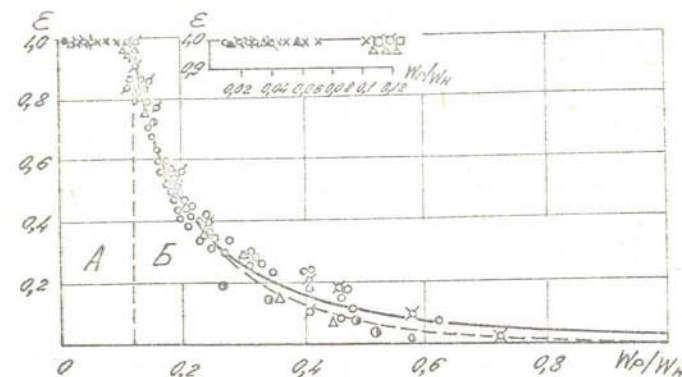


Рис. I. График зависимости степени осветления потока $\mathcal{E}$ и верхних бьефов гидроузлов от отношения W_p/W_H .
 Δ - фархадский бьеф 1949 г.; $\bigcirc$ - то же, 1951 г.;
 σ - то же 1952 г.; $\times$ - хишрауский бьеф 1958 г.;
 $\bigcirc$ - лабораторные данные (прямолинейный лоток);
 $\bullet$ - Кайраккумское водохранилище; $\blacktriangle$ - Ташкепринское водохранилище (с 1939 по 1961 г.);
 $\square$ - Тедженское (1950-1959 гг.); $\square$ - Бозсуиский бьеф;
 $\times$ - лабораторный бьеф 12 I; ϕ - Остин новое (США);
 --- по формуле (2); - - - по формуле (3).
 I - I зона, Б-II зона

емкость водохранилища удовлетворяет условию.

$$W_H \leq \frac{W_p}{0,12} = 8,33 W_p, \quad (1)$$

то процесс его заиливания ограничивается только второй стадией. Если же $W_H > 8,33 W_p$, то в процессе заиливания будет наблюдаться сначала первая, а затем вторая стадия. Это обстоятельство должно быть соответствующим образом отражено методикой расчета.

Изменение $\mathcal{E}$, соответствующее второй стадии заиливания изображается показанной на рис. I кривой, которая может быть описана уравнением

$$\mathcal{E} = 0,041 \left(\frac{W_p}{W_H} \right)^{-1,5} \quad (2)$$

Параметры уравнения (2) получены обработкой натурных и экспери -

ментальных данных методами математической статистики. При этом, согласно (2) $\varepsilon = 0,04$ при $W_p/W_H = 1,0$, тогда как теоретически должно быть $\varepsilon = 0$. Для практических расчетов это расхождение вполне допустимо. Более точно кривую $\varepsilon = f(W_p/W_H)$ на рис. 1 можно описать уравнением

$$\varepsilon = 0,041 \left[\left(\frac{W_p}{W_H} \right)^{-1,5} - \left(\frac{W_p}{W_H} \right) \right] \quad (3)$$

которое дает $\varepsilon = 0$ при $W_p/W_H = 1$. Однако использование (3) усложняет вычисления, мало изменяя получаемые результаты. Используя понятие степени осветления ε можно написать уравнение баланса наносов в следующем виде

$$dW_3 = \varepsilon \rho_i dt \quad (4)$$

где dW_3 - приращение объема отложений за интервал времени dt , ρ_i - расход наносов поступающих в водохранилище (включая и продукты размыва берегов волнами).

Для первой стадии, интегрируя (4) при $\varepsilon = 1,0$, имеем

$$W_3 = \int_0^t \rho_i dt = t_1 (G_0 + G_a), \quad (5)$$

откуда

$$t_1 = W_3' / (G_0 + G_a),$$

Здесь G_0 - среднеегодовое годовое стока наносов,

G_a - среднеегодовое годовое объема переработки берегов.

Объем заиливания к концу первой стадии $W_3' = W_H - W_H' = W_H - 8,33 W_p$.

Интегрируя (4) при изменении степени осветления согласно (2) и подставляя $W_H = W_H' - W_3''$, получим

$$\int dW_3 / (W_H' - W_3'')^{1,5} + C = \frac{0,041}{W_p^{1,5}} \int_0^t \rho_i dt$$

Откуда время заиливания второй стадии будет

$$t_2 = \frac{48,8 W_p^{1,5}}{G_0 + G_a} \left(\frac{1}{\sqrt{W_H' - W_3''}} - \frac{1}{\sqrt{W_H'}} \right) \quad (6)$$

в объем заиливания за время

$$W_3 = W_H' - t_2 G_a - 1 / \left(\frac{t_2 G_0}{48,8 W_p^{1,5}} + \frac{1}{\sqrt{W_H' - t_2 G_a}} \right)^2 \quad (7)$$

где W_3'' - объем заиливания второй стадии.

В случае малых ($J \leq 0,0001$) уклонов русла выше водохранили-

ща в расчетные формулы следует ввести дополнительный объем W_2 выражающий так называемую динамическую емкость водохранилища, т.е. объем воды между кривой подпора и уровнем воды в бытовом русле, который может существенно изменяться в процессе заиливания вследствие удлинения кривой подпора вверх по течению.

Интегрирование (4) при изменении степени осветления по (3), приводит к уравнению

$$\int_{G_0}^{\infty} \frac{dG}{G^{0,5} - G^3} = \frac{0,041}{W_p^{1,5}} \int_0^t \rho_i dt \quad (8)$$

где $G = \frac{W_p}{W_H' - W_3''}$.

Для определения значений интеграла левой части (8) на основании его численного интегрирования составлены таблица и график. Поскольку результаты расчета по предлагаемым формулам совпадают друг с другом, то при практических расчетах рекомендуются формулы (6) и (7) как более удобные для вычислений. Если объем $W_H' = 8,33 W_p$ не превышает 5-6 % от начального объема W_H , то расчет заиливания для второй стадии можно не делать, определяя продолжительность заиливания верхнего бьефа по формуле

$$T = \frac{W_H}{G_0 + G_a} \quad (9)$$

В соответствии с выявленными закономерностями можно выделить следующие три схемы процесса отложения наносов в верхних бьефах гидроузлов, отличающиеся друг от друга интенсивностью заиливания.

К первой схеме можно отнести водохранилища, имеющие $W_H \leq 8,33 W_p$, в которых с начала эксплуатации наблюдается возрастающий вынос наносов в нижний бьеф по мере заиливания верхнего бьефа (вторая стадия заиливания).

Ко второй схеме относятся водохранилища, имеющие $W_H > 8,33 W_p$, в которых наблюдается период полного отложения наносов (первая стадия заиливания) и период возрастающего выноса наносов в нижний бьеф (вторая стадия заиливания).

К третьей схеме относятся водохранилища имеющие $W_H \gg 8,33 W_p$ в результате чего период полного отложения наносов (т.е. первой стадии заиливания) составляет основную часть продолжительности заиливания.

Период возрастающего выноса наносов (т.е. второй стадии заиливания) по сравнению с общим временем заиливания оказывается настолько мал, что им можно пренебречь.

На рис.2 показан построенный по лабораторным данным график изменения степени осветления ε от отношения W_3/W_0 (W_3 - объем заиления; W_0 - предельно заиляемый объем). Согласно этому графику в первой зоне $\varepsilon = 1 = \text{const.}$, а во второй (наклонная линия) - степень осветления изменяется по выражению общего вида:

$$\varepsilon = \varepsilon' (1 - W_3/W_0) \quad (10)$$

Полученная зависимость (10) позволяет установить условия применимости некоторых существующих методов расчета заиления водохранилищ

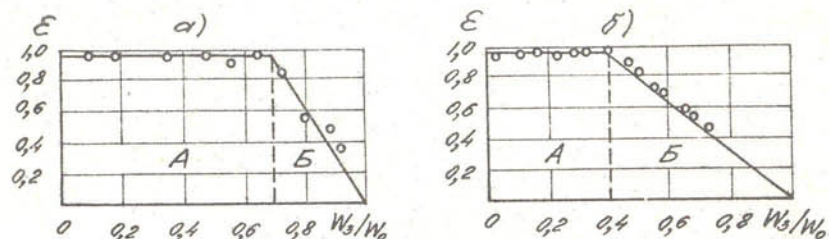


Рис.2. Графики зависимости степени осветления ε от относительной величины заиления W_3/W_0 лабораторных подпертых бьефов:

а - бьеф № 1; б - бьеф № 2;
А - первая зона; Б - вторая зона

Интегрируя (4), при изменении ε согласно (10), приходим к формуле Лепшенкова В.С.

$$W_3 = W_0 (1 - e^{-t/\varepsilon})$$

Так как формула (10) справедлива только для второй стадии, то метод Лепшенкова В.С. и все методы основанные на формулах показательного и экспоненциального вида справедливы только для расчета заиления второй стадии.

Ряд исследователей для определения нанососудерживающей способности водохранилищ используют рекомендации Бруне (США), который исходя из указанного ранее критерия Хозена (США), обработав данные натурных измерений по 44 прудовым водоемам (*ponded reservoirs*), построил графики показанные на рис.3.

На рис. 3 нанесены также данные натурных измерений нанососудер-

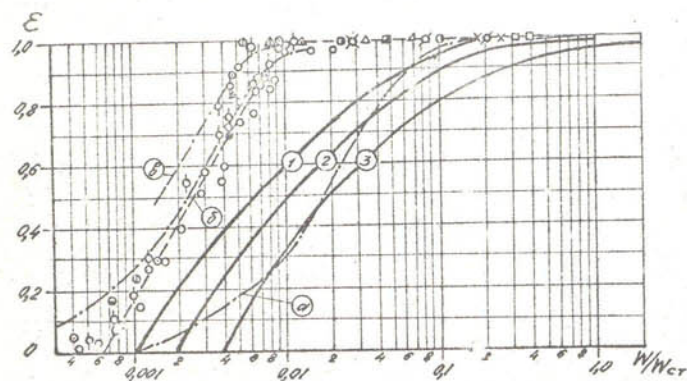


Рис.3. Графики зависимости степени осветления ε от отношения объема водохранилища W к среднегодовому стоку воды W_{cr} . Кривые Бруне: 1 - крупные наносы; 2 - средние наносы; 3 - мелкие наносы.

Натурные данные.

Бьеф:

- - Учкургенской ГЭС (р.Нарын);
 - - Хишрауской ГЭС (начало, 1958, 1960 гг.);
 - ▲ - Головной ГЭС на р.Вахш.
- Водохранилище:
- - Ташкепринское на р.Мургаб (1940-1966 гг.);
 - △ - Султанбентское на р.Мургаб;
 - - Тедженское на р.Теджен (1950-1966 гг.);
 - - Фархадское на р.Сырдарья (1947-1955 гг.);
 - × - Кайраккумское на р.Сырдарья (1956-1985 гг.);
 - - Ташкентское на р.Ангрен (1956-1962 гг.);
 - - Йолотанское на р.Мургаб;
 - × - Хорогское на р.Теджен;
 - - Гуметское (ГрузССР);
 - △ - Остин старое (США);
 - △ - Остин новое (США);
 - - Бойсен (США);
 - △ - Ладжанурское (ГрузССР).

а, б, в - расчет по формуле А.В.Караушева

$$\varepsilon = 1 - (1 - \tilde{W}) \exp(-\psi \frac{\tilde{W}}{1 - \tilde{W}}) \text{ при значениях } \psi = 35, 300 \text{ и } 500$$

живающей способности отечественных и зарубежных водохранилищ, которые существенно отличаются от кривых Бруне. Результаты рас-

четов по формуле А.В.Караушева, если принять в ней значение параметра характерное для прудов, практически совпадают с кривыми Брüne. Если же при расчетах принять значение параметра характерное для водохранилищ, то результаты расчета будут совпадать с данными натурных исследований и нашими рекомендациями. Поэтому кривые Брüne не следует применять для расчета заиления водохранилищ.

Сопоставление результатов расчетов продолжительности заиления водохранилищ по рекомендуемому нами методу с данными о заилении 16 натурных и 3-х лабораторных бьефов показали хорошее соответствие расчетных и фактических данных.

На рис. 4, 5, 6 произведено сравнение расчетных и натурных данных о заилении некоторых существующих водохранилищ. Как следует из этих рисунков результаты расчета по рекомендуемому нами методу, учитывающему две стадии заиления, хорошо соответствуют фактическому ходу отложения наносов в существующих водохранилищах.

2.2. Расчет занесения верхних бьефов низконапорных гидроузлов

Под процессом занесения подразумевается отложение только донных наносов, когда взвешенные наносы полностью выносятся в нижний бьеф.

В основу метода расчета занесения положена параболическая формула интегральной кривой фракционного состава влекомых наносов или донных отложений, впервые предложенная И.А.Бузуновым

$$\rho = \left[1 - \left(\frac{d_i}{Q} \right)^{\frac{1}{m}} \right] 100, \quad (II)$$

где ρ - процент содержания фракций $d > d_i$; Q - входящий в формулу (II) показатель степени $m = \frac{d_{oc}}{d_{cp}}$ - I теоретически обоснован А.Г.Пулатовым.

Поскольку степень осветления бьефа выражает отношение числа осевших фракций к общему их количеству, то согласно (II)

$$\varepsilon = \frac{\rho_{oc}}{100} = 1 - \left(\frac{d_{oc}}{Q} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (I2)$$

Заменяя диаметры наносов через значения соответствующих им неразмываемых скоростей, и выражая последние через расход и элементы бьефа или русла получим

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{V_p}{V_c} \right)^{\frac{3,5}{m}} = 1 - \left(\frac{V_p}{V_c} \right)^2, \quad (I3)$$

где V_p - объем русла, в котором поток транспортирует все донные наносы ($d \leq Q$).

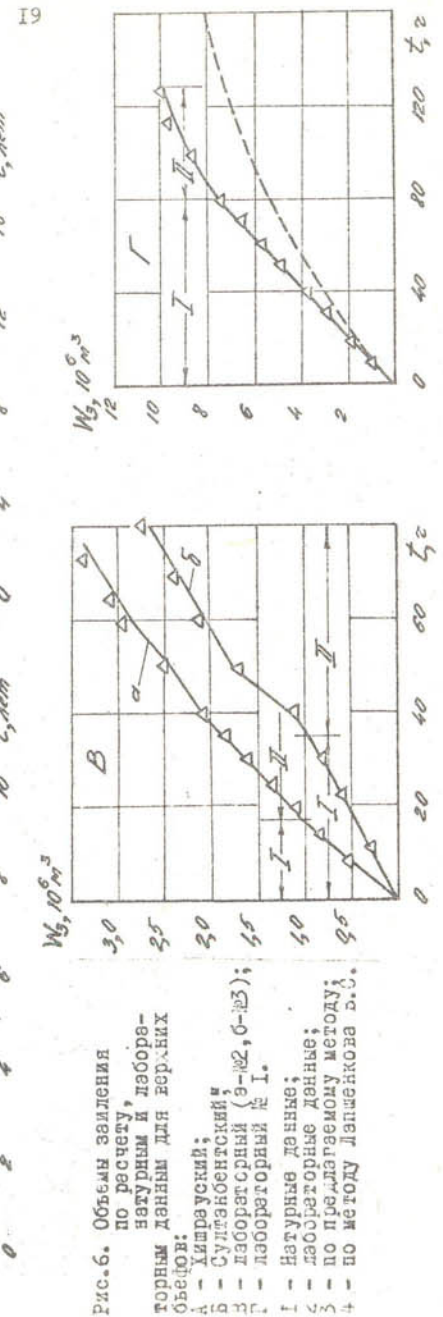
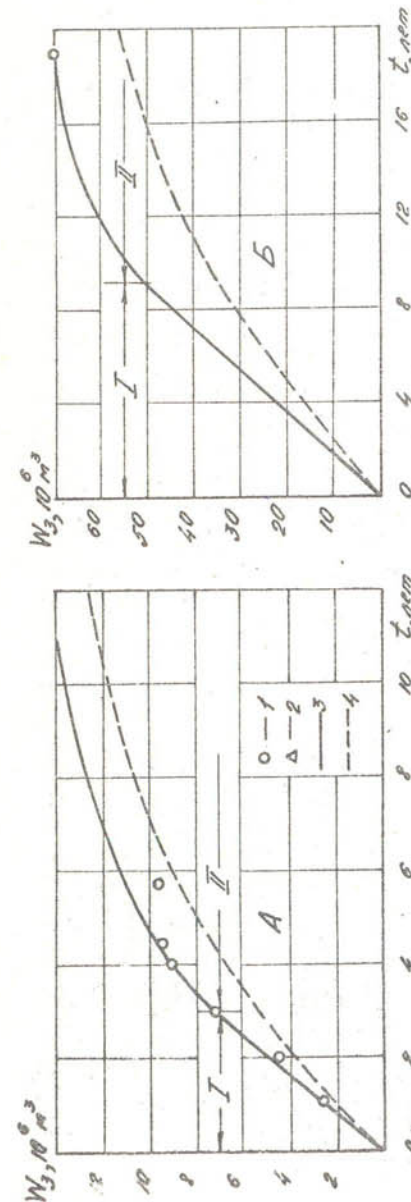


Рис. 6. Объемы заиления по расчету, натурным и лабораторным данным для верхних бьефов: А - Хитрауский; Б - Сулеймановский; В - лабораторный (3-12, 6-13); Г - лабораторный № 1. Натурные данные: 1 - лабораторные данные; 2 - по предлагаемому методу; 3 - по методу Липенкова В.С.

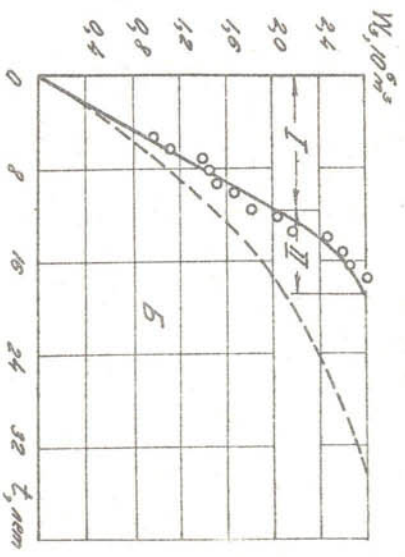
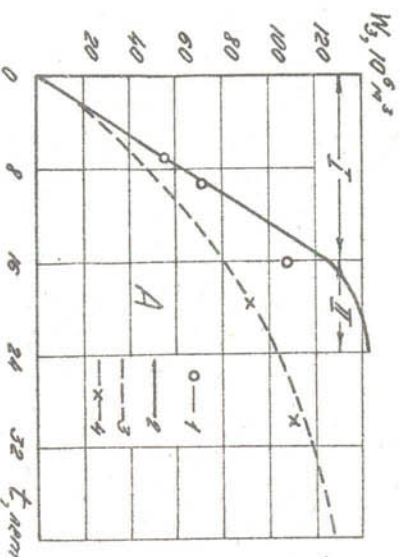


Рис.5. Объемы заполнения по расчету и натурным данным для верхних обводов:

- А - I Телженский;
- Б - Завлах (ФР) (США);
- В - Остин новое;
- Г - натурные данные;
- 1 - по расчету предлагаемым методом;
- 2 - по методу Лащенко В.С.;
- 3 - по методу Шмова Г.И.
- 4 - по методу

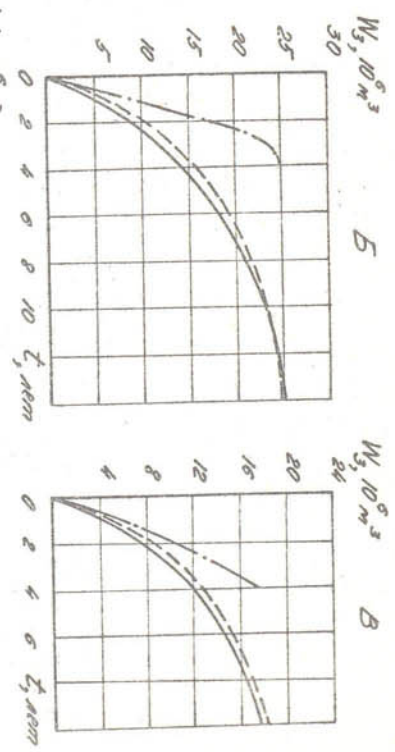
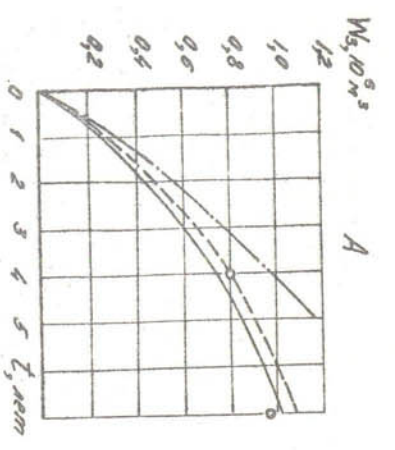
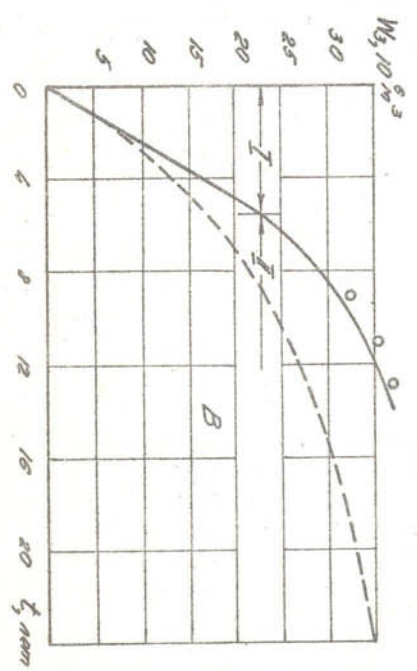
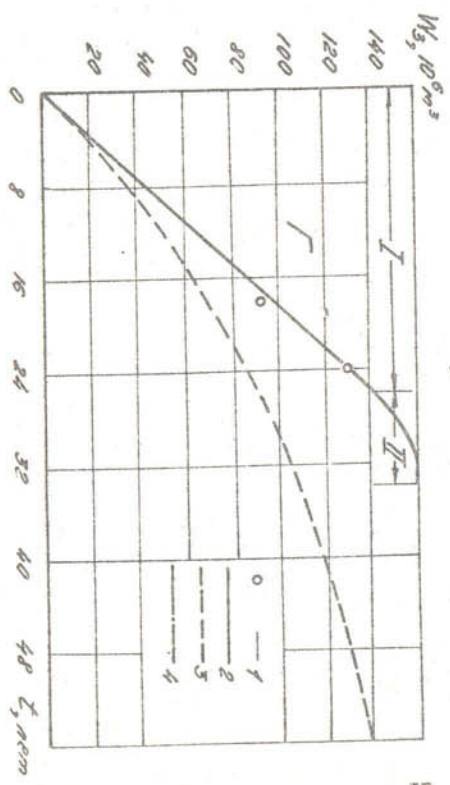


Рис.4. Объемы заполнения по расчету и натурным данным для верхних обводов:

- А - Розаумский;
- Б - Уркулинский;
- В - Султановский (второй этап);
- Г - Тейкенский;
- 1 - натурные данные;
- 2 - по расчету предлагаемым методом;
- 3 - по расчету Лащенко В.С.;
- 4 - по методу Шмова Г.И.



V_c - объем верхнего бьефа на момент времени;

$\eta = 3,5/m$

Для начальных условий при $V_p = V_{pH}$, $V_c = V_H$ имеем:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{V_{pH}}{V_H} \right)^\eta, \quad (I4)$$

где V_H - начальный объем бьефа.

Формула (I4) хорошо подтверждается данными натурных измерений.

На рис.7 показан построенный по натурным данным график зависимости изменения V_p/V_c от отношения V_3/V_0 (V_3 - объем занесения; V_0 - предельно заносимый объем).

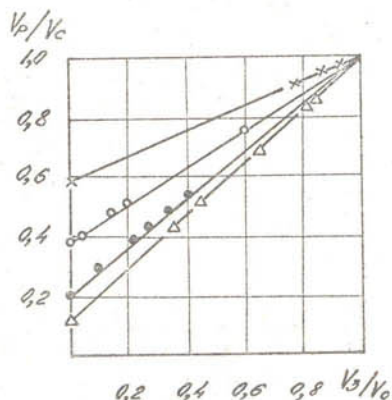


Рис.7. График зависимости $V_p/V_c = f(V_3/V_0)$ по данным натурных измерений в верхних бьефах гидроузлов:

X - Кампырватского, O - Сарыкурганского,
• - Верхнезеравшанского, Δ - Газалкентского

Согласно рис. 7 можно записать следующее уравнение

$$V_p/V_c = \alpha + K V_3/V_0 \quad (I5)$$

Для определения параметров этого уравнения используем следующие начальные и конечные условия.

При $t=0$: $V_3=0$, $V_p=V_{pH}$, $V_c=V_H$; тогда $\alpha = V_{pH}/V_H$

При $t=t_{np}$: $V_3=V_0$, $V_p=V_p'$, $V_c=V_p'$; тогда $K = 1-\alpha = 1-V_{pH}/V_H$

Подставляя в (I3) значение V_p/V_c согласно (I5) с учетом

конечного условия $K=1-\alpha$, имеем

$$\varepsilon = 1 - \left[\alpha + (1-\alpha) \frac{V_3}{V_0} \right]^\eta = 1 - x^\eta, \quad (I6)$$

где $x = \alpha + (1-\alpha) \frac{V_3}{V_0}$.

Интегрируя уравнение (4) при изменении ε согласно (I6), получим

$$\frac{V_0}{1-\alpha} \int \frac{dx}{1-x^\eta} + c = \int_0^t \rho_i dt. \quad (I7)$$

Решение левой части (I7) при замене правой части через V в случае неоднородного состава наносов ($0 < \eta < \infty$) приводит к формуле

$$V_3 = \frac{V_0}{1-\alpha} \left[\left(\frac{2}{1 + \frac{1+\sqrt{\alpha^\eta}}{1-\sqrt{\alpha^\eta}} \exp t/\phi_3} - 1 \right)^{2/\eta} - \alpha \right], \quad (I8)$$

где

$\phi_3 = V_0 A_3 / \eta (1-\alpha) G_0$; $A_3 = 0,5(1+\alpha^{1-0,5\eta})$.
Откуда продолжительность занесения до объема V_3 будет

$$t = \phi_3 \ln \frac{(1+\sqrt{x^\eta})(1-\sqrt{\alpha^\eta})}{(1-\sqrt{x^\eta})(1+\sqrt{\alpha^\eta})}. \quad (I9)$$

Совместно с А.Г.Пулатовым формула (I9) приведена к следующему упрощенному выражению

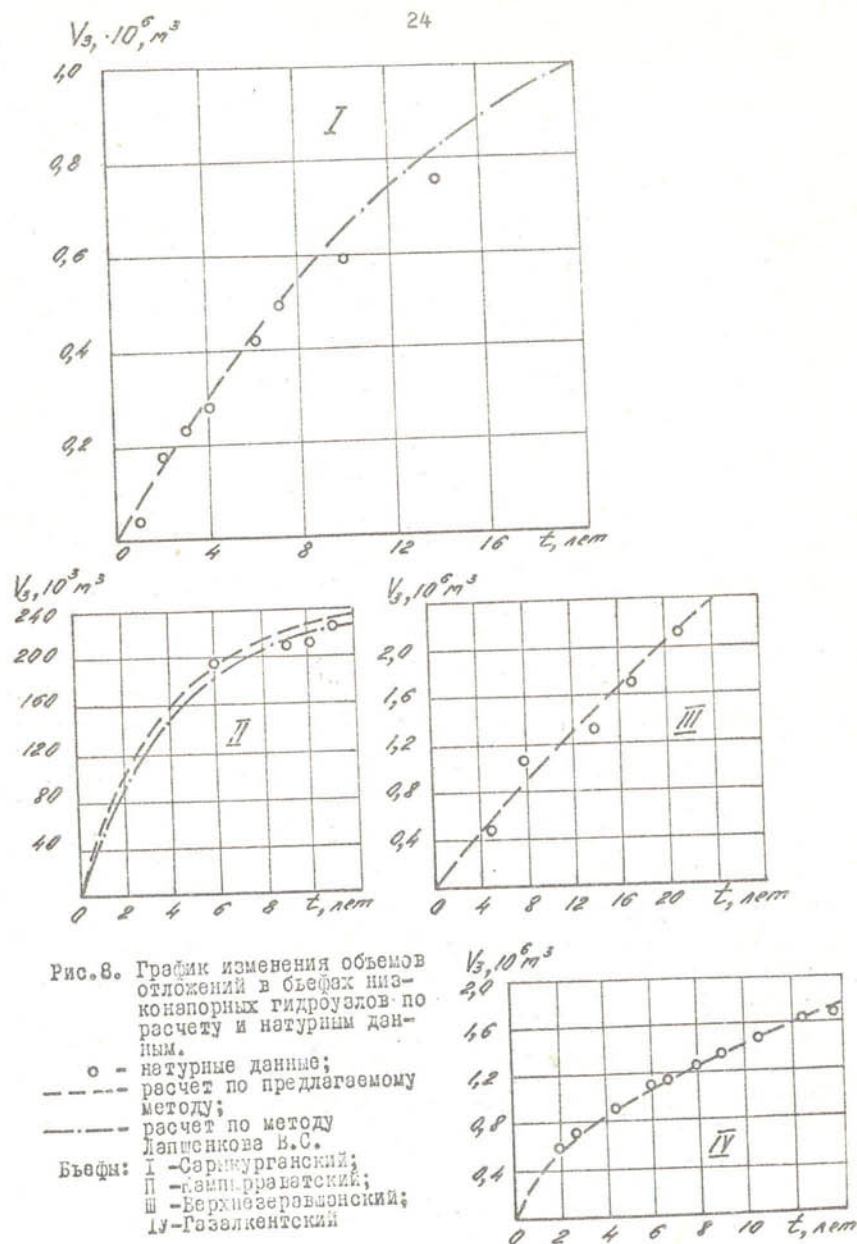
$$t = \phi_1 \ln \frac{1-\alpha^\eta}{1-x^\eta}, \quad (20)$$

где $\phi_1 = V_0 / \eta (1-\alpha) A_1 G_0$; $A_1 = 0,5(1+\alpha^{\eta-1})$.

В случае однородного состава наносов ($\eta = \infty$) из (I7) можно получить

$$t = V_3/G_0.$$

Как показывают лабораторные исследования процесс занесения однородными наносами происходит в форме гряды или конуса отложений, образующегося вблизи входного створа и постепенно перемещающегося в сторону плотины. При этом имеет место полное осаждение наносов до момента достижения грядой створа водосбросной плотины. Согласно рис.8 результаты расчета хода занесения по формуле (I9) хорошо совпадают с данными натурных измерений.



2.3. Предлагаемые способы увеличения срока службы водохранилищ

В существующей литературе для уменьшения заиливания водохранилищ рекомендуется пониженный уровеньный режим в половодье позволяющий пропустить транзитом часть взвешенных наносов, обрешивая их в нижний бьеф. Однако для практической реализации этих предложений необходимо конкретизировать в случае каких водохранилищ осуществление пониженного уровня режима эксплуатации позволит получить достаточно высокий эффект в части увеличения срока их службы.

Как указано ранее, исходя из интенсивности процесса отложения наносов, можно выделить три схемы заиливания водохранилищ.

Исходя из этих схем пониженный уровеньный режим для увеличения срока службы можно реализовать в случае водохранилищ, относящихся к первой схеме заиливания и имеющих в начальный период эксплуатации возрастающий вынос наносов в нижний бьеф.

В случае водохранилищ, относящихся ко второй расчетной схеме заиливания, тоже можно рекомендовать применение пониженного уровня режима эксплуатации.

Для водохранилищ, относящихся к третьей схеме заиливания применять пониженный уровеньный режим целесообразно, так как транзит наносов в нижний бьеф в половодье может быть эффективен только при сработке больших масс воды для создания достаточной прочности и выноса наносов в нижний бьеф, что может нанести ущерб народному хозяйству, поскольку оставшейся после этой сработки части объема стока половодья реки может не хватать для заполнения водохранилища до полного объема. В этих случаях следует применять устройство разработанное нами для удаления наносных отложений из водохранилища.

Устройство состоит из плавсредств, грунтозаборника, трубопровода уложенного на дно и концевой частью выходящей в нижний бьеф плотины и расположенной в зоне наибольших скоростей или вакуумной зоне, образующейся за порогом, через который пропущен трубопровод. Для своей работы устройство использует статический и дополнительный эжекционный напоры позволяющие осуществить разработку, всасывание и транспортировку пульпы в нижний бьеф гидроузла.

На низконапорных гидроузлах, наряду с механизированной очист-

кой, целесообразно применять гидравлический способ промыва отложившихся наносов со значительным снижением уровня воды перед плотиной, который подробно рассмотрен в существующей литературе.

В случае, если в водохранилище возможно образование плотного донного потока, сброс которого в нижний бьеф может существенно уменьшить интенсивность заиления, для расчетов такого потока следует использовать специальные формулы, которые представляют замкнутую систему уравнений, составленную по рекомендациям И.И. Леви, А.В.Бочарина и др.

В целях уменьшения потерь воды на испарение с поверхности зеркала водохранилища нами разработано специальное устройство осуществляющее сброс теплой воды из поверхностного слоя водохранилища и уменьшающее температуру этого слоя, а, следовательно, и испаряющую способность поверхности зеркала. Устройство работает за счет напора на гидроузле и имеет водоприемник в виде круглого плоского бака с отверстиями в верхней и нижней крышке, соединенного трубопроводом с донным водосбросом. Водоприемник расположен в центре водонепроницаемой платформы, погруженной в поверхность — ный слой воды на глубину 2,5-3,0 м. Платформа во время работы должна перемещаться в горизонтальной плоскости. При таком перемещении верхний теплый слой воды срезается платформой и захватывается водоприемником. Холодная же вода из нижних слоев, после перемещения платформы, замещает теплую воду верхних слоев, ушедшую через водоприемник в нижний бьеф, понижая температуру верхнего слоя.

3. Рекомендации по определению зон затопления в процессе эксплуатации водохранилищ

В процессе эксплуатации по мере заиления и занесения водохранилищ первоначальные уровни воды в зоне подпора, вследствие отложения наносов, изменяются, что вызывает изменение формы и длины кривых подпора, а, соответственно, и увеличение площадей затопления прилегающей территории. Наибольший подъем уровня воды обычно наблюдается в зоне первоначального выклинивания кривой подпора грубо определяемой пересечением плоскости зеркала водохранилища с уровнем воды в бытовом русле реки соответствующем среднему многолетнему расходу воды в этом русле.

Зная для любого момента заиления и занесения высотные положения отметки уровня воды в зоне кривых подпора легко определить

изменение дополнительной площади затопления в процессе эксплуатации водохранилища.

Ведущая роль в разработке методов расчета и построению кривых подпора при неравномерном установившемся движении воды в каналах и реках принадлежит видным советским ученым Н.Н.Павловскому, А.Н.Рахманову, В.И.Черномскому, Н.М.Бернадскому, И.А. Мосткову и др. Однако предложенные ими методы разработаны для недеформируемого русла и поэтому не учитывают изменение кривых подпора в процессе заиления и занесения бьефа. Вопросы расчета кривых подпора в процессе заиления и занесения водохранилищ посвящены работы С.Т.Алтунина, И.А.Бузунова, И.И.Леви, В.Н.Гончарова и В.И.Полтавцева, И.С.Румянцев, Р.К.Кромера, В.Н.Шолохова, И.А. Шнеера, Ф.Ш.Мухамеджанова и др.

Предлагаемые рекомендации уточняют и дополняют существующие методы расчета.

В случае заиляемого бьефа построение кривой подпора можно производить из значений уклонов водной поверхности в расчетных створах, определяемых из условия транзита заданной нагрузки по потоку наносами для чего можно использовать следующую формулу

$$J = 0,006 (p u)^{2/3} / Q^{0,1} \quad (21)$$

Применяя формулу (21) к створу верхнего бьефа характеризующего уклоном J_i при мутности P_i и крупности u_i и к бытовому руслу с уклоном J_s , в котором поток транспортирует расчетное количество наносов P_s при крупности u_s можно написать выражение

$$J_i = J_s \left(\frac{P_i}{P_s} \right)^{2/3} \left(\frac{u_i}{u_s} \right)^{2/3} \quad (22)$$

где P_i , u_i , P_s , u_s — соответственно мутность потока и крупность наносов в расчетном створе и в бытовом русле.

Выражая отношение мутности в расчетном створе через степень осветления

$$P_i/P_s = 1 - \varepsilon$$

и используя формулу, предложенную И.И.Горошковым и Н.Бекимбетовым, для определения средней гидравлической крупности наносов учитывающей изменение фракционного состава взвеси с изменением мутности вызываемой осаждением наносов,

$$u_i/u_s = (P_i/P_s)^2$$

можно привести выражение (22) к следующему виду

$$J_i = J_s (1 - \varepsilon)^2 \quad (23)$$

При построении кривой свободной поверхности, исходя из значений уклонов вычисляемых по (23), верхний бьеф разбивается на расчетные участки, после чего согласно предложения В.С.Лапшенкова объем воды, находящийся в зоне подпора выше расчетного створа, условно принимается за объем воображаемого подпорного бьефа как бы создаваемого расположенной в этом створе плотиной.

Первоначальная степень освещения потока, для таких воображаемых подпорных бьефов выше расчетного створа, определяется по формулам (2) или (3) и выявляется створ, в котором $\varepsilon = 1,0$. Значения уклонов водной поверхности во всех расчетных створах, расположенных выше створа с $\varepsilon = 1,0$ (участок 2) вычисляются по выражению (23), а ниже этого створа до створа плотины уклон принимается $J_i = 0$.

Для бьефов заиляющихся в две стадии створ с $\varepsilon = 1,0$ в процессе заиления смещается вниз по течению, достигая створа плотины в конце первой стадии. Таким образом, время заиления первой стадии определяет положение створа с $\varepsilon = 1,0$ по времени. По имеющимся расстояниям и средним уклонам между створами определяют превышения уровней воды между створами, суммируя которые к отметке подпорного уровня у плотины, определяют отметку уровня в створе выклинивания кривой подпора. Она должна равняться отметке уровня в бытовом русле на расстоянии L от плотины.

В процессе занесения верхнего бьефа низконапорных гидроузлов схема принята для расчета кривой подпора показана на рис.9. Для получения уравнения, описывающего кривую подпора, используем следующую формулу определяющую значение уклона водной поверхности в рассматриваемом створе

$$J_e = (1 - \varepsilon_e)(J_s - J_o) + J_o, \quad (24)$$

где J_o - уклон при отсутствии движения наносов.

Формула (24) выведена нами, применяя предложенную И.В.Егизаровым формулу транспортирующей способности потока к расчетному створу рассматриваемого бьефа и бытовому руслу. Для определения входящей в (24) степени освещения в расчетном створе можно использовать выражение (13), заменив входящее в него отношение V_p/V_c зоны подпора выше створа через отношение длины этого участка к общей длине подпора согласно выражению

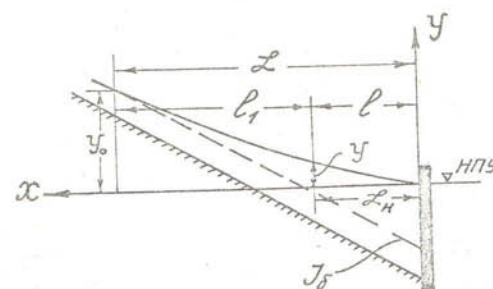


Рис.9. Расчетная схема кривой подпора в верхних бьефах низконапорных гидроузлов

$$V_p/V_c = 1 - K_p \frac{l_1}{L} \quad (25)$$

где K_p - некоторый коэффициент.

Подстановка (25) в (13) дает

$$\varepsilon_e = 1 - (1 - K_p \frac{l_1}{L})^{\eta} \quad (26)$$

Из условия $l_1 = L$, $\varepsilon_e = \varepsilon_s$, имеем

$$K_p = 1 - (1 - \varepsilon_s)^{1/\eta}, \quad (27)$$

где ε_s - степень освещения в створе плотины.

Из (20) с учетом (16), получим

$$\varepsilon_s = (1 - \alpha^{\eta}) \exp(-t/\varphi_1) \quad (28)$$

Подставляя (28) в (27), получим

$$K_p = 1 - [1 - (1 - \alpha^{\eta}) \exp(-t/\varphi_1)]^{1/\eta} \quad (29)$$

Заменяя в (24) $J = dy/dx$ и выражая входящую в (24) степень освещения согласно (26) после интегрирования левой и правой части, имеем

$$y = \int_0^L [(J_s - J_o)(1 - K_p \frac{l_1}{L})^{\eta} + J_o] dl \quad (30)$$

Решение (30) приводит к выражению

$$y = \frac{L(J_s - J_o)}{K_p(\eta + 1)} [(1 - K_p \frac{l_1}{L})^{\eta+1} - (1 - K_p)^{\eta+1}] + J_o(L - l_1) \quad (31)$$

или

$$y = \frac{L(\bar{J}_f - \bar{J}_0)}{K_p(\eta+1)} \left\{ \left[1 - K_p \left(1 - \frac{\bar{L}}{L} \right) \right]^{\eta+1} - (1 - K_p)^{\eta+1} \right\} + \bar{J}_0 \bar{L} \quad (32)$$

где $\bar{L} = L - \bar{L}_1$

Подставляя в (31) частные значения $\bar{L}_1 = 0$, $y = \bar{J}_f L - \Delta H$, соответствующие створу выклинивания кривой подпора, получаем формулу для определения длины кривой подпора в рассматриваемый момент времени

$$L = K_1 \frac{\Delta H}{\bar{J}_f - \bar{J}_0} \cong K_1 \bar{L}_H \quad (33)$$

где $K_1 = \frac{K_p(\eta+1)}{K_p(\eta+1) + (1-K_p)^{\eta+1} - 1}$, $\Delta H = H_n - H_f$,
здесь K_p - определяется по формуле (29).

4. Расчет оптимальных элементов мелиоративных каналов для различных режимов их эксплуатации

Оптимальность элементов русла каналов прежде всего определяется соблюдением его устойчивости.

Проблеме устойчивости русел посвящено значительное число работ как у нас в стране, так и за рубежом.

Большой вклад в развитие теории устойчивости и разработку методов расчета устойчивых русел внесли советские ученые: С.Х.Абальянц, С.Т.Алтуни, И.А.Бузунов, В.С.Алтуни, К.Ф.Артемонов, М.А.Великанов, Т.Г.Войнич-Сяноженцкий, К.В.Гришанин, Г.В.Железняков, Ю.А.Ибад-Заде, Ю.Г.Иваненко, И.Ф.Карасев, А.А.Кадыров, Н.Б.Кереселидзе, А.И.Лаксберг и В.П.Троицкий, В.С.Лапшенков, М.А.Михалев, А.М.Мухамедов, Б.К.Рабокова, Н.А.Ржаницын, А.В.Троицкий, Х.Ш.Шепиро, Т.А.Алиев, Р.И.Самедов, Г.П.Скребков, Ч.Г.Нуриев и др.

За рубежом проблеме устойчивости посвящены работы П.Аккерса, Р.Каландера, Д.Лейси, В.Лангбейна, Л.Леопольда, Д.Саймонса и др.

Разработанные нами рекомендации дополняют и развивают существующие проработки.

Распространенная в практике проектирования каналов методика их расчета исходящая из условий неразрывности и неизменяемости для определения формы русла использует формулу С.А.Гиршкана

$$\beta = b/h = 3Q^{0,25} - m$$

Согласно же теоретических проработок А.В.Троицкого гидравлическая устойчивость потока в трапециевидальном русле сохраняется при значении $\beta = 10-12$. При значениях $\beta > 12$ динамическая ось потока может перемещаться в плане, вызывая соответствующие плановые деформации русла.

Поскольку нарушение гидравлической устойчивости вызывает продольные изменения структуры потока относительно геометрической оси канала, то эту устойчивость целесообразно назвать продольной устойчивостью потока и русла.

Наряду с блужданием потока нарушение устойчивости канала вызывается несоответствием поперечных размеров русла ширине потока, отвечающей продольной устойчивости. Руслу при этом стремится расширяться до устойчивой ширины соответствующей кинематической структуре потока. Эту устойчивость целесообразно именовать поперечной устойчивостью.

Следовательно, плановая устойчивость канала включает продольную и поперечную устойчивость русла.

Наряду с потерей плановой устойчивости, нарушение устойчивости русла канала может вызываться такими факторами как: ветровые и судовые волны, повороты канала в плане, просадки и усадки грунта, наличие сужений в створах мостовых переходов, быстрый режим опорожнения канала и т.п. Однако эти факторы, как правило, вызывают локальные деформации не приводящие к существенному изменению режима работы канала.

4.1. Классификация режимов эксплуатации каналов

В процессе эксплуатации мелиоративных каналов в результате воздействия потока на русло устанавливается такое равновесие, при котором элементы канала в полной мере соответствуют кинематической структуре потока, определяемой заданной степенью гидравлической устойчивости. Степень устойчивости потока определяет также характер движения наносов и их количество, положение потока и русла в плане, степень воздействия потока на дно и берега русла и ряд других характеристик соответствующих различным режимам эксплуатации.

Для мелиоративных каналов целесообразно различать следующие режимы эксплуатации, в качестве числовой характеристики которых можно принять параметр

1. Статический устойчивый режим.

Характеризуется отсутствием движения наносов, с крупностью частиц слагающих русло, что соответствует неразмывающей скорости. Можно выделить:

- а) русло статического равновесия - $\varphi = 0,074$;
- б) русло предельного равновесия - $\varphi = 0,10$.

2. Квазидинамический режим (переходный).

Занимает промежуточное положение между статической и динамической устойчивостями. Характеризуется началом возникновения донных образований в виде рифелей и подготовки потока к транспорту всех частиц донных наносов. Береговые деформации отсутствуют.

По состоянию наносов можно выделить:

- а) начало движения наносов при $\varphi = 0,13$;
- б) начало массового движения наносов при $\varphi = 0,20$.

3. Динамически устойчивый режим.

Подразделяется на два вида:

а) динамически устойчивый режим прямолинейного русла, при котором по руслу канала транспортируются донные наносы в виде рифелей и первичных гряд, при сохранении прямолинейности потока в плане. Береговые деформации русла отсутствуют. Характеризуется значениями $\varphi = 0,20 \div 0,42$;

б) динамически устойчивый режим извилистого русла, при котором поток и русло принимают криволинейную устойчивую в плане форму, транспортируя донные наносы в виде первичных искривленных в плане гряд, что соответствует ленточно-грядовому типу руслового процесса. Если русло канала построить прямолинейным, то в процессе его эксплуатации возникнут береговые деформации противоположного знака, располагающиеся в шахматном порядке, в результате которых будет формироваться русло криволинейное в плане.

Если берега канала сложены из связанных грунтов, то прямолинейность его русла может сохраняться за счет их неразмываемости, но динамическая ось потока в русле будет искривлена относительно геометрической оси самого канала. Режим характеризуется значениями $\varphi = 0,42 \div 1,0$.

г) Неустойчивый режим.

В случае несвязных грунтов ложа характеризуется постоянными изменениями пленового положения потока и русла.

Если берега сложены связными грунтами, а дно несвязными, то возможно сохранение первоначальной прямолинейности русла. При этом искривленная динамическая ось потока непрерывно меняет местоположение (аналогичен побочному типу руслового процесса). Характеризуется значением $\varphi > 1,0$.

4.2. Параметр, характеризующий режим эксплуатации

Принятый нами для оценки режимов эксплуатации каналов параметр можно представить в виде

$$\varphi = HJ/d = v_*^2/gd \quad (35)$$

Численные значения параметра φ , указанные выше, для каждого режима эксплуатации получены по данным натурных и лабораторных исследований приведенных в литературе и полученных автором. Обратная величина этого параметра в виде gd/v_*^2 предлагалась для оценки устойчивости русла М.М. Гришиным, М.А. Великановым, Н.И. Маккавеевым, И.И. Леви, М.А. Мостковым.

Известны и другие параметры для оценки устойчивости русла. Так, Н.А. Гженицын предложил параметр

$$Y = \frac{dB}{H^2J} = \frac{d}{HJ} \cdot \frac{B}{H} \quad (36)$$

который учитывает в комплексе продольную и поперечную устойчивость. Однако мы считаем более целесообразным рассматривать каждую из этих устойчивостей отдельно, так как при наличии пленовых деформаций канала необходимо установить какая устойчивость нарушена, чтобы наметить соответствующие мероприятия для ее восстановления.

4.3. Поперечная устойчивость русла

Под поперечной устойчивостью русла мы понимаем такую устойчивость, при которой отсутствует поперечное расширение русла, условием чего может служить определенная устойчивая ширина по урезу воды, отвечающая заданному φ . Следовательно, устойчивая ширина должна быть строго увязана с гидравлической устойчивостью для того, чтобы размеры русла соответствовали той кинематической структуре потока, которая создается заданным режимом

эксплуатации, определяемым параметром

В существующих зависимостях по определению устойчивой ширины русла отсутствует указанная взаимосвязь и так как коэффициент шероховатости назначается произвольно, чаще завышенным, то это вызывает суждение потока за счет нарушения гидравлической устойчивости при повышенных уклонах водной поверхности и как следствие наблюдается размыв берегов при устойчивой ширине.

Свидетельством отсутствия взаимосвязи ширины русла с гидравлической устойчивостью служит значительное расхождение результатов расчета устойчивой ширины по существующим формулам для заданных конкретных условий, что и вызвало необходимость уточнения и дополнения известных рекомендаций.

Приняв за основу формулу предложенную А.В.Троицким для расчета устойчивой ширины канала, по натурным данным определены значения коэффициента пропорциональности для различных условий устойчивости и следующих видов грунтов:

- а) берега и дно сложены мелкопесчаными грунтами;
- б) берега сложены связными грунтами, а дно песчаное;
- в) берега и дно сложены гравелисто-галечниковыми грунтами.

В соответствии с полученными значениями коэффициента расчет ширины канала по урезу воды в зависимости от грунтовых условий русла можно производить по следующим формулам:

а) в случае каналов проложенных в мелкопесчаных грунтах и каналов, дно которых песчаное, а берега сложены связными грунтами

$$B = 1,15 \left[1 + K \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \frac{Q^{0,37}}{J^{0,20}} \quad (37)$$

где K - коэффициент пропорциональности, значения которого следует принимать:

- при полностью песчаном русле $K = (0,078 + 0,051)$;
- при песчаном дне, супесчаных берегах $K = (0,051 + 0,019)$;
- при песчаном дне, суглинистых и глинистых берегах $K = (0,051 + 0)$;

б) в случае гравелисто-галечниковых грунтов

$$B = 1,596 \left[1 + 0,0604 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \frac{Q^{0,37}}{J^{0,20}} \quad (38)$$

4.4. Коэффициент шероховатости русел каналов

Пропускная способность русла канала и его устойчивость зависят от гидравлических сопротивлений, определению которых посвящены работы Н.Н.Павловского, И.И.Агроскина, Д.В.Штеренлихта, Г.В.Железнякова, М.А.Мосткова, Б.Ф.Снищенко, Э.Д.Копалиани, В.Н.Гончарова, А.А.Кадырова, В.П.Щегловой, А.А.Чирковой, В.Ф.Талмазы, М.П.Сасорова и др.

Для оценки гидравлических сопротивлений русла принимают безразмерный коэффициент гидравлических сопротивлений λ или обратную ему величину - коэффициент Шези $C = \sqrt{2g/\lambda}$. Большинство существующих формул выражают коэффициент Шези в зависимости от гидравлического радиуса (средней глубины) и коэффициента шероховатости, определение значения которого вызывает серьезные затруднения ввиду отсутствия достаточно надежных показателей для его выбора в каждом конкретном случае. Как правило коэффициент шероховатости назначается в зависимости от внешней характеристики смоченной поверхности русла, а также от условий производства работ при строительстве канала или устраиваемого в нем покрытия. В натурных оросительных каналах и руслах рек имеет место движение донных наносов, в результате которого дно покрыто морфологическими образованиями (рифели, гряды), определяющими в основном значение коэффициента шероховатости русла. Размер и форма этих образований зависят от количества наносов, а, следовательно, от режима эксплуатации канала.

Построенные по натурным данным графики зависимости коэффициента шероховатости от условий устойчивости позволили получить формулы следующего вида:

а) для русел с песчаным дном и берегами из связных и несвязных грунтов

$$n = n_0 \left[1 + 0,083 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \quad (39)$$

б) для русел из гравелисто-галечниковых грунтов

$$n = n_0 \left[1 + 0,16 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right)^{0,54} \right] \quad (40)$$

где $n_0 = 0,0524 d^{1/6}$ (формула Чанга).

4.5. Связь средней скорости потока с режимом эксплуатации каналов

Заданная пропускная способность канала обеспечивается при средней скорости течения в значительной степени зависящей от режима эксплуатации.

Принимая для определения средней скорости формулу Шези $V = (\sqrt{J}/n) R^{0,5+y}$ для увязки ее с условиями эксплуатации приведем эту формулу к следующему виду

$$V = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{HJ}{d}} \left(\frac{R}{H} \right)^{0,5+y} H^y \sqrt{d} \quad (41)$$

Формула (41) включает множитель $(R/H)^{0,5+y}$, служащий коррективом, учитывающим влияние на скорость потока разницу между гидравлическим радиусом и средней глубиной потока.

Принимая $R \approx H$, получим

$$V = (\sqrt{\varphi}/n) H^y \sqrt{d} \quad (42)$$

Формула (42), предложенная ранее в несколько ином виде М.А.Мостковым, отражает связь средней скорости с режимом эксплуатации каналов.

В частном случае, для статически устойчивого режима ($\varphi = \varphi_0$ и $n = n_0 = 0,0524 d_{cp}^y$) имеем

$$V_0 = (\sqrt{\varphi_0}/n_0) H^y \sqrt{d} = K_v H^y d^{0,5-y} \quad (43)$$

По структуре формула (43) аналогична формулам для определения нерезывающей скорости предложенным Г.И.Шамовым, А.М.Латышенковым, В.Н.Гончаровым, Г.С.Чекулаевым, И.И.Левин, И.К.Никитиным, Я.В.Бодряшкиным, И.Я.Орловым, М.А.Мостковым, В.С.Лепшенковым, А.А.Кадыровым и др.

Однако при практических расчетах лучше применять формулу общего вида (42), которая позволяет определять среднюю скорость для момента прекращения движения гряд, принимаемую в этих условиях в качестве нерезывающей скорости. Определение значений нерезывающей скорости из условия прекращения движения донных песчаных гряд при различных глубинах воды производилось СНИИРИ на Кызылжарском канале в Чимкентской области КазССР. Результаты расчета по формуле (42) дали хорошее совпадение с полученными натурными данными. Расчет по формуле (42) также установлено, что в случае гладкого дна нерезывающие скорости на 40 % больше

чем при грядовом дне.

Нерезывающие скорости вычисленные по формуле (42) при глубине 1 м и $d_{cp} = 0,2$ мм изменяются в пределах $V_{0,1} = 0,26 - 0,42$ м/с в зависимости от условий устойчивости и морфологического строения дна. Существующие зависимости, в том числе и зарубежные, также показывают изменение скорости в указанных пределах, но не объясняют причин таких больших расхождений.

4.6. Расчет оптимальных элементов мелиоративных каналов

Русло проектируемого канала характеризует элементы Q , B , H , J , n .

Первый элемент Q , при проектировании задается. Последние четыре должны определяться расчетом в зависимости от режима эксплуатации, так как произвольное принятие хотя бы одного из них уже сразу задает соответствующую ему степень устойчивости русла.

Для нахождения этих элементов следует использовать систему следующих уравнений справедливую в случае расчета устойчивых сечений каналов как в мелкопесчаных, так и в связных грунтах

$$H = \left\{ \frac{n Q^{0,63}}{1,15 [1 + K (\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1)] \varphi^{0,3} d^{0,3}} \right\}^{\frac{1}{1,2+y}} \quad (44)$$

$$J = \frac{\varphi d}{H} \quad (45)$$

$$B = 1,15 [1 + K (\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1)] \frac{Q^{0,37}}{J^{0,20}} \quad (46)$$

При решении этой системы значение коэффициента шероховатости определяется по формуле (25). Уравнения (44), (45) и (46) системы получены совместным решением выражений (35), (37) и (42). Совместное решение (35), (37) и (42) дает формулу для определения глубины канала проложенного в гравелисто-галечниковых грунтах

$$H = \left\{ \frac{n Q^{0,63}}{1,596 [1 + 0,0604 (\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1)] \varphi^{0,3} d^{0,3}} \right\}^{\frac{1}{1,2+y}} \quad (47)$$

Остальные элементы канала B , n , J определяются соответственно по формулам (38), (40) и (45).

Из приведенных формул следует, что при сохранении постоянных значений φ и при изменении величины расхода воды, значение параметра формы русла B/n не изменяется, т.е. оказывает - ся независимым от величины расхода Q . Если же с изменением расхода воды изменяется и устойчивость русла, определяемая параметром φ , то значение параметра B/n также изменяется, создавая иллюзию зависимости его от расхода воды. Этим объясняется существование в литературе двух групп морфометрических формул отличающихся между собой формулой связи B/n от Q .

Согласно предлагаемых формул предельное значение параметра формы русла, отвечающего режиму динамической устойчивости прямолинейного русла, при котором сохраняется гидравлическая устойчивость можно принять $B/n = 26$, что совпадает с рекомендациями В.С.Алтунина (устойчивость русла сохраняется при $B/n = 26 + 30$), опытными данными И.М.Селяметова ($B/n=26$) и результатами натурных исследований А.А.Кадырова и З.Н.Нуритдинова, которые, изучая кинематическую структуру потока в каналах, установили наличие гидравлической устойчивости при $B/n=25$, а при $B/n=35-40$ - блуждание потока.

Рекомендуемые А.В.Троицким, С.А.Гиршкеном значения относительной ширины по дну $\beta = b/h = 10-12$ при переводе их в значения параметра формы, с помощью формулы

$$B/n = (\beta + 2m)^2 / (\beta + m), \quad (48)$$

при заложении откоса $m=4$, дают значения $B/n=23 + 25$, что вполне согласуется с нашими рекомендациями.

5. Рекомендации по изучению режимов эксплуатации мелиоративных каналов в лабораторных условиях

При проектировании каналов встречаются такие вопросы эксплуатации как влияние зарастания на пропускную способность, применение различных видов крепления откосов, занесение песком и пылью приносимых ветром, отложения наносов на участке водораспределения, деформация канала после включения в него сбросного или подпитывающего русла и т.п. Эти вопросы могут решаться только

путем лабораторных исследований на размываемых моделях. При проектировании таких моделей большое значение имеет правильный выбор масштабов.

Известно много методов расчета масштабов моделей размываемых русел. Большой вклад в развитие теории подобия и методов моделирования внесли ученые: С.Х.Абальянц, Р.Р.Абдураупов, С.Т.Алтунин, В.С.Алтунин, М.А.Великанов, Н.С.Знаменская, А.В.Караушев, В.С.Лапшенков, И.И.Леви, М.А.Мостков, Н.А.Рженицын, Н.Н.Сурова и др. Среди зарубежных исследований наибольший интерес представляют работы П.Аккерса, Дж. Харбертсона, Де Вриса, Р.Гарде и др.

Все известные методы моделирования, размываемых русел основаны на искажении масштабов и имеют существенный недостаток заключающийся в том, что в них в скрытом виде искажается плановая устойчивость русла модели по сравнению с натурой.

Составляя отношение показателя устойчивости природы к модели с помощью параметра φ , принимая условие равенства поперечного и продольного масштабов и используя соотношения осн - новных масштабов предложенное С.Т.Алтуниным, получим для мелкопесчаных моделей с натурным песком следующее выражение

$$\varphi_H / \varphi_M = \alpha \frac{2m-1}{\beta} \quad (49)$$

где α - плановый масштаб;

m - показатель степени в формуле С.Т.Алтунина.

Как видно из (49) только при $m=0,5$ соблюдается условие $\varphi_M = \varphi_H$. Но во всех существующих морфометрических зависимостях $m>0,5$ и поэтому $\varphi_M < \varphi_H$. Для правильного отображения режимов эксплуатации необходимо условие

$$\varphi = idem \quad (50)$$

При этом условии из рекомендуемых формул по расчету устойчивых сечений вытекает независимость B/n от расхода воды, а это означает

$$B/n = idem \quad (51)$$

Откуда следует, что два потока с одинаковым режимом эксплуатации должны иметь геометрически подобные поперечные сечения, т.е.

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha}{h}. \text{ Из (50) вытекает выражение для масштаба уклона}$$

$$\alpha_i = \alpha_d \alpha_{\sigma-1} / \alpha_h \quad (52)$$

Из формулы Шези получим выражение для масштаба скорости

$$\alpha_v = \frac{1}{n} \alpha_h^y (\alpha_d \alpha_{\sigma-1})^{0,5} \quad (53)$$

Для масштаба расхода воды имеем

$$\alpha_Q = \frac{1}{n} \alpha_h^{2+y} (\alpha_d \alpha_{\sigma-1})^{0,5} \quad (54)$$

Коэффициент шероховатости на мелкопесчаной модели канала определяется по формуле полученной по данным лабораторных исследований автора и данным различных исследователей, следующего вида

$$\eta_M = \eta_0 \left[1 + K' \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right)^{0,7} \right], \quad (55)$$

где $K' = 0,26-0,20$

Рекомендуемая методика моделирования была проверена в СНИИРИ к.т.н. Хусан-Ходжаевым Э.З. путем сравнения поперечных сечений с изотаксами построенными по результатам опытов на песчаной модели Кызылкумского канала с натурными данными. Сравнение показало вполне удовлетворительное соответствие лабораторного русла натурному.

6. Прогноз изменения уровня режима оросительных каналов с водозабором из водохранилищ

Проектируемые каналы в мелкопесчаных грунтах с динамическими условиями устойчивости и каналы старых оросительных систем, осуществляющих бесплотинный водозабор из реки с большим содержанием наносов, которые предполагается переключить на водозабор из водохранилищ, будут связаны с общим размывом русла осветленным потоком или потоком, содержание наносов в котором постепенно увеличивается по мере заиливания верхнего бьефа.

Таким образом, прогнозируемые изменения уровня режима таких каналов должно быть основано на методике расчета общего размыва, которую целесообразно разделить на методику расчета размыва осветленным потоком и методику расчета размыва при возрастающем поступлении наносов из водохранилищ.

6.1. Методика расчета размыва осветленным потоком

Расчетная схема размыва русла осветленным потоком показана на рис.10.

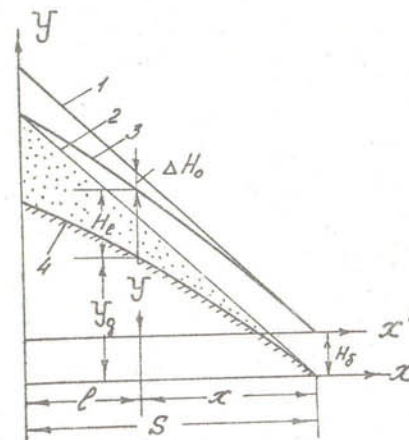


Рис.10. Расчетная схема общего размыва русла осветленной водой при мелкопесчаных грунтах: 1, 2 - бытовой уровень воды; 3, 4 - уровень воды и дна в размывом русла

Согласно выражению (24) можно написать:

$$J_\ell = \frac{\mu_\ell}{\mu_g} (J_g - J_0) + J_0 \quad (56)$$

где μ_ℓ и μ_g - удельное содержание наносов в створе на расстоянии ℓ от плотины размываемого русла и в бытовых условиях на расстоянии S равном длине участка размыва.

Согласно данным многолетних лабораторных исследований различных авторов удельное содержание наносов μ_ℓ можно определить по выражению

$$\mu_\ell = \mu_g \left[1 - \left(\frac{S - \ell}{S} \right)^2 \right] \quad (57)$$

Подставляя (57) в (56), заменяя $J = -dy/dx$, и интегрируя полученное выражение, будем иметь

$$y = \int \left\{ J_0 + \left[1 + \left(\frac{S - \ell}{S} \right)^2 \right] (J_g - J_0) \right\} d\ell + C$$

После взятия квадратур правой части и определения постоянной получим следующую формулу

$$y = y_0 + \frac{(j_s - j_0) \ell^3}{3 S^2} - \frac{(j_s - j_0) \ell^2}{S} - j_0 \ell. \quad (58)$$

Для определения понижения уровней воды в расчетных створах выражение (58) приведем к виду

$$\Delta H_0 = \Delta H_1 - y_0 + \ell(j_s - j_0) \left[\frac{\ell}{S} - 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\ell}{S} \right)^2 \right], \quad (59)$$

где $y_0 = \frac{S}{3} (2j_s + j_0)$, $\Delta H_1 = j_s (S - \ell)$

Расчетная формула для определения распространения размыва в зависимости от продолжительности деформации русла может быть получена исходя из следующего выражения для объема размыва

$$W_{раз} = B \left[\frac{j_s S^2}{2} - \int_0^S y_g d\ell \right]. \quad (60)$$

Подставляя в интеграл правой части (60) выражение изменения дна в размываемом русле $y_g = y + H_s - H_e$ и исключая y с помощью (58) после взятия квадратур и решения относительно длины S (с заменой $W_{раз} = t G_0$), получим

$$S = \frac{\sqrt{N^2 + 4 M t G_0 / B} - N}{2 M}, \quad (61)$$

где

$$M = \frac{1}{12} (j_s - j_0), \quad N = 0,5 (0,9 H_0 - H_s)$$

В случае наличия базиса эрозии (закрепленная неразмываемая точка на продольном профиле дна размываемого русла), длина общего размыва русла ограничивается расстоянием от плотины до места расположения этого базиса S_0 . При этом кривая свободной поверхности на участке размыва русла описывается уравнением

$$y = \int \left[k \frac{\ell}{S_0} (j_s - j_0) + j_0 \right] d\ell + C. \quad (62)$$

Откуда, после решения (62) и определения значения постоянной C , имеем

$$y = y'_0 - j_0 \ell - \frac{k \ell^2}{2 S_0} (j_s - j_0), \quad (63)$$

где

$$y'_0 = j_0 S_0 + 0,5 k S_0 (j_s - j_0).$$

Для определения снижения уровней воды в расчетных створах уравнение (63) можно представить в виде

$$\Delta H_0 = j_s S_0 - y'_0 + \ell (j_s - j_0) \left(\frac{k \ell}{2 S_0} - 1 \right). \quad (64)$$

Поскольку коэффициент K уменьшения стока наносов в створе базиса эрозии изменяется по мере размыва русла, то его значение зависит от объема размыва или от продолжительности размыва. Выражение для объема размыва при изменении значений коэффициента от K_n до K_{n+1} можно записать в виде S_0

$$W_{раз} = B \left[\int_0^{S_0} (y_g)_n d\ell - \int_0^{S_0} (y_g)_{n+1} d\ell \right] \quad (65)$$

Подставляя в левую часть (65)

$$W_{раз} = t_p G_0 0,5 (K_n + K_{n+1}), \quad (66)$$

и исключая из правой части y_g с помощью выражения для поверхности дна и (63) после взятия квадратур и решения относительно продолжительности размыва, получим

$$t_p = \frac{1/3 B S_0^2 (j_s - j_0) (K_n + K_{n+1}) + 0,5 B S_0 (H_{n+1} - H_n)}{0,5 (K_n + K_{n+1}) G_0} \quad (67)$$

В начальный момент времени и после того как размыв достигнет базиса эрозии, коэффициент $K_n = 1$. В процессе расчета необходимо задать значением $K_{n+1} < 1$ и определить время размыва t_p , которому соответствует K_{n+1} . Затем за начальное значение принимается K_{n+1} и задается новым значением $K_{n+1} < K_{n+1}$ и т.д. Для определения глубин H_{n+1} и H_n в створе базиса эрозии, соответствующих значениям коэффициентов K_{n+1} и K_n , рекомендуется зависимость

$$H_n = H_s \left(\frac{j_s}{j_n} \right)^{0,295} \quad (68)$$

Уклон водной поверхности в створе базиса эрозии j_n можно определять по формуле (56), произведя замену $M_e = K / H_s$

6.2. Расчет снижения уровней воды в каналах с учетом наносов поступающих из верхнего бьефа низконапорных гидроузлов

На участке размыва наносы транспортируемые потоком можно разделить на наносы, поступающие вместе с водой из верхнего бьефа, которые назовем транзитными, и наносы, представляющие продукты размыва дна и берегов русла, которые можно именовать русловыми. Расчетная схема размыва для этого случая показана на рис. II.

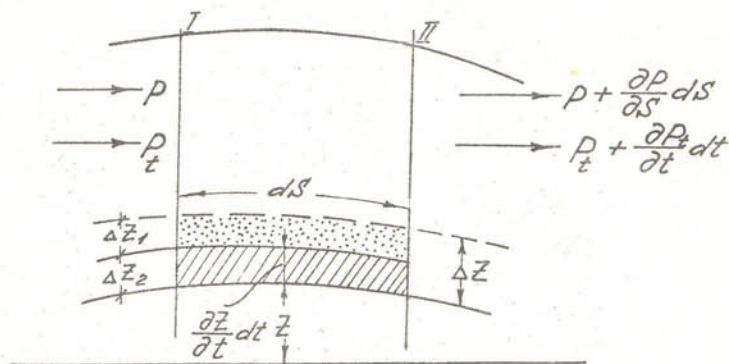


Рис. II. Расчетная схема общего размыва русла с учетом наносов поступающих из верхнего бьефа

Согласно этому рисунку через створ I на расчетный участок поступает расход наносов P и через створ 2 выходит расход наносов $P + \frac{\partial P}{\partial s} ds$.

Если бы в нижний бьеф, через створ I, поступал осветленный поток (без наносов), то за время dt в створе 2 приращение количества наносов $\frac{\partial P}{\partial s} ds dt$ произошло бы только за счет продуктов размыва русла соответствующих понижению дна на величину ΔZ . Однако в рассматриваемых условиях на расчетный участок через створ I поступают транзитные наносы, расход которых увеличивается во времени. Расход этих наносов на момент времени t обозначим через P_t . Интенсивность его изменения будет $\frac{\partial P_t}{\partial t} dt$ и соответственно количество транзитных наносов за время dt составит $\frac{\partial P_t}{\partial t} dt dt$.

На расчетной схеме рис. II условно транзитные наносы можно представить в виде слоя толщиной ΔZ_2 , уменьшающего движение дна до величины $\Delta Z_1 = \Delta Z - \Delta Z_2$.

Поскольку транзитные наносы P_t входят в общий расход наносов P , то приращение количества наносов в створе 2 должно состоять из приращения количества транзитных наносов в створе I и продуктов размыва русла на рассматриваемом участке за время dt при снижении дна на величину ΔZ_2 , которая в

нашем случае будет меньше величины размыва дна осветленным потоком ΔZ . Количество русловых наносов, поступающих на рассматриваемый участок через створ I, равно $(P - P_t) dt$, а выходящих за его пределы через створ 2 составит

$$\left[P + \frac{\partial P}{\partial s} ds - \left(P_t + \frac{\partial P_t}{\partial t} dt \right) \right] dt$$

Это позволяет написать дифференциальное уравнение баланса наносов и деформации русла

$$\left[P + \frac{\partial P}{\partial s} ds - \left(P_t + \frac{\partial P_t}{\partial t} dt \right) \right] dt - (P - P_t) dt = -\gamma' B \frac{\partial Z}{\partial t} dt ds \quad (69)$$

Откуда

$$v \frac{\partial P}{\partial s} - \frac{\partial P_t}{\partial t} = -\gamma' B \frac{\partial Z}{\partial t} v, \quad (70)$$

где $v = \frac{ds}{dt}$.

Решение (70) произведено нами с помощью вспомогательной системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для начального створа участка размыва имеем

$$P_H - P = P_t + C, \quad (71)$$

где P - транспортирующая способность потока на момент времени t ;

$P_H = P_K$ - расход наносов в русле (канале) в начале размыва;

C - некоторая константа.

Для расхода наносов поступающих в канал из водохранилища можно записать выражение

$$P_t = (1 - K_H) P_g (1 - \varepsilon), \quad (72)$$

где K_H - коэффициент безнаносного водозабора;

P_g - расход наносов в реке в бытовых условиях.

Подставляя в (72) выражение для степени осветления согласно (28), получим

$$P_t = (1 - K_H) P_g \left[1 - (1 - a^r) e^{-\frac{t}{\Phi_1}} \right] \quad (73)$$

Подставляя (73) в (71) и определив постоянную C из начальных условий, будем иметь

$$P = P_K - (1 - K_H) P_g (1 - a^r) \left(1 - e^{-\frac{t}{\Phi_1}} \right) \quad (74)$$

Формула (74) отражает изменение транспортирующей способности потока в голове размываемого канала в зависимости от условий забора

наносов из водохранилища и продолжительности размыва.

Размыв русла в начальном створе размываемого участка канала прекратится когда увеличивающийся расход поступающих из верхнего бьефа наносов станет равным транспортирующей способности потока в этом створе размываемого русла.

Приравняв правые части (73) и (74) получим, следующую формулу для определения предельного времени размыва канала

$$t_{np} = \Phi_1 \ell_n \frac{2(1-\alpha^q)(1-K_H)}{(1-\alpha^q)[1+(1-\alpha^q)-\rho_K/\rho_F]} \quad (75)$$

Для построения кривой свободной поверхности в размываемом русле канала и определения понижения уровней воды используем формулу (56), приведя ее в соответствие с рассматриваемыми условиями к следующему выражению

$$J_x = \frac{\rho_x}{\rho_K} (J_K - J_0) + J_0 \quad (76)$$

Формула (74) для расчетного створа примет вид $\frac{tx}{\Phi_1 S}$

$$\rho_x = \rho_K - (1-K_H) \rho_F (1-\alpha^q) (1 - e^{-\frac{tx}{\Phi_1 S}}) \quad (77)$$

Подставляя (77) в (76) и заменив $J_x = dy/dx$, после интегрирования получим следующее уравнение поверхности воды в размываемом русле

$$y = J_K x - (J_K - J_0)(1-K_H) \frac{\rho_F}{\rho_K} (1-\alpha^q) x - \frac{tx}{\Phi_1 S} + (J_K - J_0)(1-K_H) \frac{\rho_F}{\rho_K} (1-\alpha^q) \frac{\Phi_1 S}{t} e^{-\frac{tx}{\Phi_1 S}} + (J_K - J_0) \frac{\Phi_1 S}{t} (1-K_H)(1-\alpha^q) \frac{\rho_F}{\rho_K} \quad (78)$$

Для определения снижения уровней воды в процессе размыва можно использовать выражение

$$\Delta H_0 = (J_K - J_0)(1-K_H) \frac{\rho_F}{\rho_K} (1-\alpha^q) x - (J_K - J_0) \frac{\Phi_1 S}{t} (1-K_H)(1-\alpha^q) \frac{\rho_F}{\rho_K} (1 - e^{-\frac{tx}{\Phi_1 S}}) \quad (79)$$

Для определения длины распространения размыва S используем следующую зависимость:

в) геометрический объем размыва дна согласно принятой расчетной схемы размыва (рис. 10)

$$W_{раз} = B \left[\frac{J_K S^2}{2} - \int_0^S y_g dx \right] \quad (80)$$

б) возможный объем размыва, выраженный разностью между стоком наносов соответствующем транспортирующей способности потока в русле канала за пределами размыва и стоком наносов поступающих из верхнего бьефа:

$$W_{раз} = t G_K - \frac{(1-K_H) T_1}{\delta_H} \int_0^t \rho_F [1 - (1-\alpha^q) e^{-\frac{t}{\Phi_1}}] dt; \quad (81)$$

в) уравнение поверхности дна размываемого русла $y_g = y + H_g - H_e$;

г) уравнение (78) поверхности воды в размываемом русле.

В результате совместного решения указанных уравнений и интегрирования полученного дифференцированного уравнения, а также некоторых преобразований, получим

$$S = \frac{\sqrt{N^2 + (1/B) 4M} \{ t G_K - \frac{(1-K_H) T_1}{\delta_H} [\rho_F t - \rho_F (1-\alpha^q) (1 - e^{-\frac{t}{\Phi_1}}) - N] \}}{2M} \quad (82)$$

где $N = 0,5(H_F - H_K)$; $H_F = H_K \left(\frac{J_K}{J_F} \right)^{0,292}$;

$$M = (J_K - J_0)(1-K_H)(1-\alpha^q) \frac{\rho_F}{\rho_K} \left(\frac{\Phi_1^2}{t^2} - \frac{1}{2} - \frac{\Phi_1^2}{t^2} e^{-\frac{t}{\Phi_1}} - \frac{\Phi_1}{t} \right)$$

H_F, J_F - глубина и уклон водной поверхности в начальном створе размываемого участка канала.

Решая совместно (76) и (77) при $x = \frac{S}{\Phi_1}$, имеем

$$J_F = [1 - (1-K_H) \frac{\rho_F}{\rho_K} (1-\alpha^q) (1 - e^{-\frac{t}{\Phi_1}})] (J_K - J_0) + J_0 \quad (83)$$

6.3. Расчет размыва отводящего речного русла в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов с учетом наносов из верхнего бьефа

Для разработки методики расчета использованы:

а) уравнение расхода наносов сбрасываемых через плотину в нижний бьеф

$$\rho_t = K_H \rho_F [1 - (1-\alpha^q) e^{-\frac{t}{\Phi_1}}] \quad (84)$$

б) уравнение расхода наносов в бытовом русле нижнего бьефа (за пределами общего размыва)

$$\rho_H = \rho_F (1 - \psi) \quad (85)$$

где ψ - для расходов воды в реке, поступающих в канал.

Подставляя (84) и (85) в (71) после определения постоянной интегрирования из начальных условий, имеем

$$\rho = \rho_s [1 - \psi - K_H (1 - \alpha^h) (1 - e^{-\frac{t}{\phi_1}})] \quad (86)$$

Приравнявая левые части (84) и (86), получим

$$t_{np} = \phi_1 \ell n \frac{2 K_H (1 - \alpha^h)}{K_H + \psi + K_H (1 - \alpha^h) - 1} \quad (87)$$

в начальном случае когда $K_H + \psi = 1$, $t_{np} = 0,7 \phi_1$. Таким образом формула (87) позволяет определить предельное время размыва, после которого на начальном участке начнется процесс занесения нижнего бьефа, вызываемый сбросом через плотину расхода наносов, превышающего транспортирующую способность размывного русла.

Для построения кривой свободной поверхности в размывном русле и определения снижения уровней воды используем формулу (56), которая для рассматриваемых условий примет вид

$$J_x = \frac{\rho_x}{\rho_s (1 - x)} (J_s - J_0) + J_0 \quad (88)$$

Выражение (86), для определения расхода наносов в расчетном створе, можно записать в виде

$$\rho_x = \rho_s [1 - \psi - K_H (1 - \alpha^h) (1 - e^{-\frac{tx}{\phi_1 S}})] \quad (89)$$

Подставляя (89) в (88) и заменив $J_x = \frac{dy}{dx}$ после интегрирования, получим уравнение поверхности воды в размывном русле

$$y = J_s x - (J_s - J_0) \frac{K_H}{1 - \psi} (1 - \alpha^h) x - (J_s - J_0) \frac{K_H}{1 - \psi} (1 - \alpha^h) \frac{\phi_1 S}{t} e^{-\frac{tx}{\phi_1 S}} + \frac{\phi_1 S}{t} + \frac{K_H}{1 - \psi} (J_s - J_0) (1 - \alpha^h) \quad (90)$$

Для определения снижения уровней воды имеем

$$\Delta H_0 = (J_s - J_0) \frac{K_H}{1 - \psi} (1 - \alpha^h) x - \frac{\phi_1 S}{t} \frac{K_H}{1 - \psi} (J_s - J_0) (1 - \alpha^h) (1 - e^{-\frac{tx}{\phi_1 S}}) \quad (91)$$

Для определения длины распространения размыва S путем аналогичным выводом формулы (82), но выражая транспортирующую способность потока в нижнем бьефе через $(1 - \psi) t G_0$, получим формулу

$$S = \frac{\sqrt{N^2 + \frac{1}{B} 4 M \left\{ (1 - \psi) t G_0 - \frac{\tau_1 K_H}{\rho_s} [\rho_s t - \rho_s (1 - \alpha^h) \phi_1 (1 - e^{-\frac{t}{\phi_1}})] \right\}} - N}{2 M'} \quad (92)$$

где $N = 0,5 (H_p - H_s); H_p = H_s \left(\frac{J_s}{J_0} \right)^{0,292};$

$$M' = \frac{(J_s - J_0) K_H (1 - \alpha^h)}{1 - \psi} \left(\frac{\phi_1^2}{t^2} - \frac{1}{2} - \frac{\phi_1^2}{t^2} e^{-\frac{t}{\phi_1}} - \frac{\phi_1}{t} \right).$$

H_p, J_0 - глубина и уклон водной поверхности в начальном створе размываемого участка.

Решая совместно (88) и (89) при $x = S$, имеем

$$J_p = [1 - \frac{K_H}{1 - \psi} (1 - \alpha^h) (1 - e^{-\frac{t}{\phi_1}})] (J_s - J_0) + J_0 \quad (93)$$

Наименьший размер камня, оставшегося несмытым к началу процесса завала нижнего бьефа можно определять по формуле

$$d_i = D \left\{ \frac{[1 - \frac{K_H}{1 - \psi} (1 - \alpha^h) (1 - e^{-\frac{t}{\phi_1}})] (J_s - J_0) + J_0}{J_s} \right\} \quad (94)$$

6.4. Сопоставление результатов расчета изменения уровня режима по предлагаемому методу с данными натурных исследований

Рекомендуемый метод расчета общего размыва русла осветленным потоком разработан в общем виде и поэтому может быть рекомендован для расчета размыва каналов и русел рек. На рис. 12 показано сравнение результатов расчета, выполненного по разработанной методике общего размыва осветленным потоком, с данными натурных и лабораторных исследований. Как следует из этого рисунка опытные данные хорошо подтверждают данные полученные расчетом.

Расчет продолжительности общего размыва с учетом наносов поступающих из верхнего бьефа, по разработанной нами методике, также производился применительно к условиям натурных гидроузлов. Результаты этих расчетов, приведенные в диссертации, хорошо подтвердились натурными данными.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Предложенный метод определения срока службы водохранилищ с разделением процесса заиления на две стадии позволяет более точно прогнозировать аккумуляцию наносов и значительно упростить определение срока службы (продолжительность заиления) водохранилищ, расчет заиления которых должен производиться только по линейной

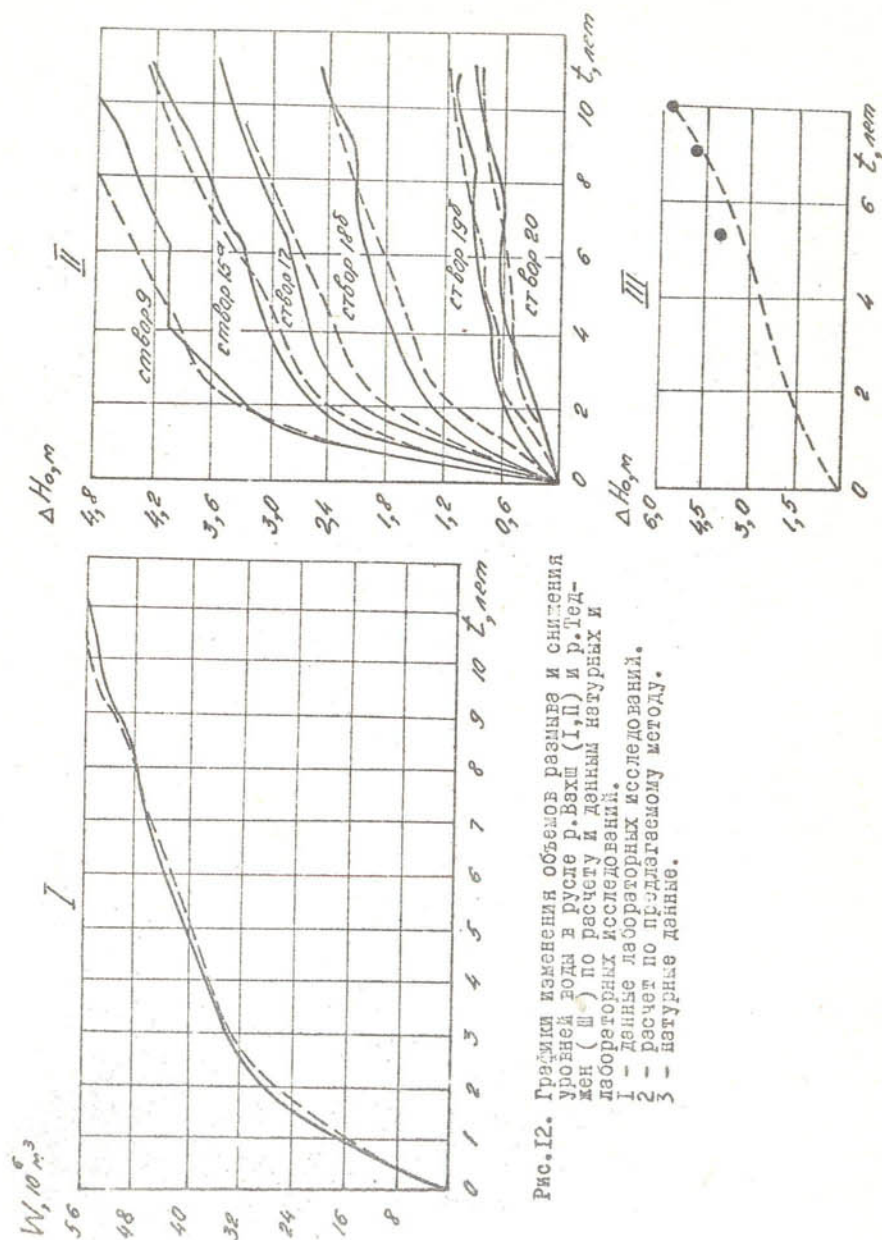


Рис. 12. Графики изменения объемов размыта и сращения
уровня воды в русле р. Вых (I, II) и в. Тед-
жен (III) по расчету и данным натурных и
лабораторных исследований.
1 - данные лабораторных исследований.
2 - расчет по предлагаемому методу.
3 - натурные данные.

зависимости (9) соответствующей первой стадии заиления, определить условия применимости существующих методов.

Формулы (6) и (7) рекомендуемые для расчета второй стадии заиления, не требуют дополнительных громоздких вычислений по определению первоначальной степени осветления бьефа, которые необходимо делать при использовании существующих методов расчета.

Методы расчета заиления использующие показательные и экспоненциальные формулы справедливы только для расчета второй стадии заиления.

Известные в литературе кривые Броне (США), для расчета наносодерживающей способности, построены только по данным натурных измерений заиления прудовых водоемов и поэтому не могут быть рекомендованы для расчета заиления водохранилищ.

2. Для расчета занесения верхних бьефов низконапорных гидротурбин получены формулы (18) и (19), которые учитывают неоднородность состава наносов и исключают громоздкие вычисления по определению начальной степени осветления, необходимые при применении существующих методов расчета.

В случае однородных наносов процесс занесения характеризуется полным их отложением в течение всего периода аккумуляции.

Существующие рекомендации основанные на данных лабораторных исследований с песчаными материалами, по составу близки к однородному, достаточно правильно отражают ход занесения бьефов такими наносами.

3. Для увеличения срока службы водохранилищ относящихся к первой и второй схемам заиления целесообразно применять пониженный уровеньный режим эксплуатации, при котором мутная вода в начале половодья пропускается через водохранилище при уровне воды ниже НПУ, что обеспечивает высокие скорости течений и значительный транзит наносов в нижний бьеф.

Для водохранилищ заиляющихся согласно первой стадии (третья схема) целесообразнее уменьшать заиление с помощью разработанного автором устройства по удалению наносов со дна водохранилища, которое использует для работы статический и эжекционный напоры.

Для борьбы с испарением из водохранилищ рекомендуется устрой-

ство позволяющее осуществлять сброс теплой воды поверхностных слоев аккумулируемого в водохранилище объема воды в нижний бьеф, тем самым понижая температуру воды на поверхности зеркала и уменьшая его испаряющую способность.

4. Для определения изменения площади затопления прибрежной территории связанного с отложением наносов в процессе эксплуатации гидроузлов разработаны методы расчета кривых подпора раздельно для водохранилищ и для верхних бьефов низконапорных гидроузлов.

Предлагаемый метод расчета кривых подпора в водохранилищах предусматривает разделение водохранилищ на озерную и русловую части.

К озерной части относится наиболее глубоководная часть части водохранилища с практически горизонтальной поверхностью. Русловая часть является более мелководной, в начальной части которой сосредотачивается осаждение наносов и где происходит формирование русла вызывающее соответствующее увеличение уклонов водной поверхности и повышение уровня воды приводящее к удлинению кривой подпора вверх по течению. Одновременно гряда наносных отложений постепенно распространяется в сторону плотины, уменьшая размеры озерной части водохранилища и увеличивая размеры русловой его части.

Для расчета кривых свободной поверхности в зоне подпора наносимых бьефов получена формула (32), показатель степени которой η зависит от фракционного состава наносов. При $\eta = 1$ формула (32) переходит в уравнение квадратичной параболы, которое ранее принимали для описания кривой подпора С.Т.Алтуни и И.А.Бузунов.

5. При оценке устойчивости русла в несвязных грунтах необходимо выделять продольную (гидравлическую) и поперечную устойчивости, рассматривая их раздельно, а также и во взаимосвязи, которая определяет плановую устойчивость.

Для оценки продольной устойчивости, выражающей неизменность планового положения динамической оси, прямолинейного или криволинейного потока, целесообразно использовать параметр Шильдса, численная величина которого зависит от вида устойчивости и может принимать значения согласно приведенным ранее рекомендациям

составленным по натурным и лабораторным данным.

Различная степень продольной устойчивости потока определяет характер движения наносов и их количество, положение потока и русла в плане, степень воздействия потока на дно и берега русла и в целом характеризует соответствующий режим эксплуатации. Для мелиоративных каналов целесообразно различать следующие режимы эксплуатации: статический, квазидинамический, динамически устойчивый, неустойчивый. Каждый из них дополнительно характеризуется состоянием русла и наносов и численным значением параметра φ .

Для оценки поперечной устойчивости русла, понимаемой как отсутствие поперечного расширения сечения, принято условие устойчивой ширины по урезу воды, определяемое формулой А.В.Троицкого, которая после некоторых преобразований и определения коэффициента пропорциональности по данным натурных исследований приведена к выражениям учитывающим взаимосвязь поперечной устойчивости с режимом эксплуатации каналов.

6. Полученные по данным натурных исследований формулы (39) и (40) позволяют определять значения коэффициента шероховатости для каждого принимаемого режима эксплуатации, что устраняет имевшую место ранее неопределенность когда значения этого коэффициента выбирались исходя из словесной характеристики смоченной поверхности и ее состояния.

7. В результате проведенных исследований разработан принципиально новый метод расчета устойчивых русел каналов в несвязных, связных и гравелисто-галечниковых грунтах, который в отличие от существующих методов позволяет определять гидравлические элементы сечений из ожидаемых или принимаемых режимов эксплуатации.

Главным фактором, определяющим изменение параметра формы русла B/H от водности потока является параметр φ характеризующий режим эксплуатации. Существующие формулы морфометрии приводящие зависимости параметра формы русел от расхода воды, получены обработкой натурных и лабораторных данных соответствующих сечениям русла с различной степенью его устойчивости, изменяющейся в зависимости от водности потока.

8. Для моделирования крупных каналов в несвязных грунтах разработан новый метод расчета масштабных множителей, в основу которого положены условия:

- а) геометрическое подобие сечений модели и природы;
- б) равенства на модели и в природе параметра продольной устойчивости.

9. Для расчета общего размыва русел рек и каналов сложенных из мелкопесчаных грунтов осветленным потоком, поступающим из водохранилищ можно использовать формулы (59) и (61), которые позволяют определить снижение уровня воды в расчетных створах и длину распространения размыва.

10. Расчет общего размыва канала после начала поступления донных наносов из верхнего бьефа можно производить по формулам (75), (79) и (82) позволяющим определить предельное время размыва, снижения уровня воды и длину распространения размыва до момента начала занесения русла сбрасываемыми наносами. Расчет размыва русла в нижнем бьефе гидроузлов выполняется по формулам (87), (91) и (94).

Для определения наименьшего диаметра камня, остающегося не смытым в начале размыва в процессе деформации русла, можно использовать формулу (95) позволяющую установить возможность образования самоотмостки дна до начала занесения русла.

11. Проверка основных положений рекомендуемых методов произведенная путем сравнения результатов расчета с данными натурных и лабораторных исследований, показала их высокую надежность.

12. Рекомендуемые методы расчета использованы при проектировании целого ряда объектов, что дало ежегодный экономический эффект порядка 6,5 млн руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО
В СЛЕДУЮЩИХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТАХ АВТОРА

1. Скрыльников В.А. Расчет продолжительности заиливания подпорных бьефов и водохранилищ. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 3, 1966, с. 52-58.
2. Скрыльников В.А. Расчет общего размыва русла в мелкопесчаных грунтах. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 2, 1965, с. 64-75.
3. Скрыльников В.А. К вопросу расчета общего размыва русла в мелкопесчаных грунтах. Труды САННИРИ, вып. II7, 1968, с. 140-145.
4. Скрыльников В.А. Прогноз общего размыва в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов. Труды САННИРИ, вып. II7, 1968, с. 146-159.
5. Скрыльников В.А. Расчет продолжительности занесения верхних бьефов низконапорных гидроузлов. Известия АН УзССР, серия техн. наук № 1, 1970, с. 50-55.
6. Скрыльников В.А., Пулатов А.Г. О расчете продолжительности занесения верхних бьефов низконапорных гидроузлов. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 4, 1976, с. 51-55.
7. Скрыльников В.А., Пулатов А.Г. Расчет кривой подпора в процессе занесения верхнего бьефа низконапорных гидроузлов. Труды САННИРИ, вып. I51, Ташкент, 1976, с. 67-71.
8. Скрыльников В.А., Пулатов А.Г. О расчете кривой подпора в верхнем бьефе низконапорных гидроузлов. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 6, 1976, с. 45-47.
9. Скрыльников В.А., Губина Т.Ю. Расчет устойчивых гидравлических элементов больших каналов в несвязных грунтах. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 3, с. 52-59.
10. Скрыльников В.А., Губина Т.Ю. К вопросу расчета устойчивых сечений крупных каналов в мелкопесчаных грунтах. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 1, 1980, с. 61-67.
11. Скрыльников В.А., Доктионов А.Г. Расчет продолжительности размыва русла в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов с учетом наносов поступающих из верхнего бьефа. Известия АН УзССР, серия техн. наук, № 4, с. 43-46.

12. Скрыльников В.А., Локтионов А.Г. Расчет деформации русла в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов. Труды САНИИРИ, выпуск к 80-летию со дня рождения С.Т.Алтунина, Ташкент, 1984, с.67-72.
13. Скрыльников В.А. Некоторые закономерности процесса занесения верхних бьефов низконапорных гидроузлов. Труды САНИИРИ, вып. 120, Ташкент, 1970, с.231-248.
14. Скрыльников В.А. Некоторые закономерности процесса заиления верхних бьефов гидроузлов. Сборник научных трудов САНИИРИ, вып.152, Ташкент, 1977, с.68-73.
15. Скрыльников В.А. Расчет гидравлических элементов устойчивых сечений крупных каналов в мелкопесчаных грунтах "Гидротехническое строительство", № 2, 1983, с.32-34.
16. Скрыльников В.А. Расчет коэффициента шероховатости русл рек в несвязных грунтах "Гидротехника и мелиорация", № 2, 1983, с. 35-38.
17. Скрыльников В.А., Кожевникова М.С. Пособие к ВСН-П-14-76. Расчет заиления подпертых бьефов гидроузлов и водохранилищ. Изд.САНИИРИ, Ташкент, 1984, с.51.
18. Скрыльников В.А., Локтионов А.Г. Пособие к ВСН-П-14-76. Расчет деформации русла в нижнем бьефе низконапорных гидроузлов. Изд.САНИИРИ. Ташкент, 1984, с.16.
19. Скрыльников В.А. Определение устойчивых значений параметра формы русла при расчетах гидравлических элементов каналов в несвязных грунтах. Труды САНИИРИ, вып. к 80-летию со дня рождения С.Т.Алтунина. Ташкент, 1984, с. 148-155.
20. Скрыльников В.А., Пулатов А.Г. Временные методические указания по расчету занесения верхних бьефов низконапорных гидроузлов. Изд.САНИИРИ, Ташкент, 1981, с.33.

В.И.Ириш

Р-05285. Подписано в печать 19.02.87
формат 60x84 1/16. Объем 2,35 уч. изд.л.
Тираж 150 экз. Заказ 75

Отпечатано на ротопринте САНИИРИ
г.Ташкент, ул.Я.Коласа, 24