

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ**

(Материалы и Технические указания по расчетам
гидрологического режима при строительном проектировании)

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ**

(Материалы к Техническим указаниям по расчетам
гидрологического режима при строительном проектировании)

Редактор А.В. Караушев

Подписано к печати 17/1 1966 г. Заказ № 1.
Тираж 450 экз. Уч.-изд.л. 6,1.

М - 20010.

Бесплатно.

Фотоофсетная лаборатория ГГИ ВНИГЛ, Валдай.

Содержание

	Стр.
Введение	5
I. Общие положения	7
II. О полевых исследованиях, обеспечивающих исходный материал для расчета заиления водохранилищ и прудов	11
III. Общие сведения о формировании и режиме стока наносов	12
IV. Методы оценки и расчета стока взвешенных наносов	13
V. Учет изменчивости годового стока наносов при расчете заиления	24
VI. Учет внутригодовой изменчивости стока воды и наносов при расчете заиления водохранилищ	29
VII. Вычисление транспортирующей способности потока и расхода наносов	33
VIII. Вычисление расходов влекомых наносов	47
IX. Оценка объемного веса отложений в заиляемых водохранилищах	53
X. Особенности расчета заиления водохранилищ с различной относительной емкостью	53
XI. Способы расчета продолжительности полного заиления и объемов заиления водохранилища по годам	57
XII. Расчет заиления водохранилища за один год при использовании нормы стока наносов	61
XIII. Расчет заиления водохранилищ при учете многолетней изменчивости стока наносов	68
XIV. Расчет отложения влекомых наносов в водохранилищах	68
XV. Расчет заиления водохранилищ по участкам	71
XVI. Расчет заиления малых водохранилищ и прудов	73
XVII. Расчет мутности водных масс в водохранилищах при учете волнового взмучивания	79
Литература	87

Введение

Расчет заиления водохранилищ и прудов имеет характер достаточно сложного комплексного расчета, включающего целый ряд операций, основанных как на чисто гидрологических вычислениях, так и на гидравлических. В журнальных статьях по расчету заиления водохранилищ и в монографической литературе до сих пор имело место одностороннее изложение методики этого расчета. Вопросу выбора расчетных значений стока наносов, учету его многолетней и внутригодовой изменчивости не уделялось достаточного внимания, между тем это в значительной мере определяет успех расчета. В настоящих рекомендациях приводится комплексное рассмотрение гидрологического и гидравлического аспектов методики расчета заиления. При выполнении расчета заиления в качестве промежуточных величин получаются значения мутности воды в водохранилище. Эти величины могут иметь и самостоятельное практическое значение. По этой причине в рекомендации включена и методика расчета мутности водных масс водохранилищ, учитывающая ветро-волновое взмучивание.

Настоящие рекомендации по расчету заиления водохранилищ были обсуждены в июле 1965 г. на межведомственном совещании, в котором приняли участие представители 23 проектных, производственных и научно-исследовательских организаций. Рекомендации по расчету заиления были представлены на обсуждение в качестве проекта "Технических указаний по расчетам гидрологического режима при строительном проектировании (Расчет заиления водохранилищ)".

Совещание одобрило представленный материал как основу для выработки окончательного текста Технических указаний, рекомендовало учесть ряд замечаний и издать материал для практического использования и дальнейшего обсуждения его до утверждения Госстроем.

При подготовке настоящего издания были по возможности учтены пожелания и замечания, высказанные на совещании.

Практические рекомендации по расчету заиления водохранилищ составлены в ГГИ докт.техн.наук, проф. А.В. Караушевым, кандидатами географ.наук И.В. Боголюбовой и К.Н. Лисициной при участии мл.научных сотрудников К.В. Разумихиной, Г.А. Петуховой и А.Я. Шварцман. В разработке рекомендаций принял также участие сотрудник Укр.НИГМИ, канд.географ.наук Н.И. Дрозд, которым составлены карты мутности рек

Украины и Крыма и даны указания по учету стока наносов водотоков и заиления прудов по этой территории. Редактирование рекомендаций выполнено А. В. Караушевым.

В Технических указаниях "Расчет заиления водохранилищ", представленных на утверждение в Госстрой, излагаются в сжатом виде приведенные здесь практические рекомендации. Просьба к организациям и лицам сообщить ГГИ свои замечания для использования при подготовке окончательного варианта упомянутых ТУ.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Заиление водохранилища обусловлено осаждением в его чаше наносов, поступающих с водосбора вместе со стоком рек и ручьев, питающих водохранилище, или наносов, образующихся в результате обрушения его берегов; может иметь место и ветровой (золотой) перенос наносов в водоем с прилегающих участков суши.

2. Настоящие практические рекомендации содержат указания по расчету заиления, обусловленного стоком наносов.

Оценка заиления, происходящего за счет обрушения берегов, должна выполняться на основании известных методов расчета формирования берегов водохранилищ (см. например, метод разработанный в ГГИ Н.Е. Кондратьевым [12]). Получая объемы обрушения берегов за соответствующие годы, добавляют их к объемам заиления, полученным по стоку наносов.

Количественную оценку золотого фактора заиления в настоящее время вряд ли можно осуществить. Обычно количество наносов, поступающих таким путем в водохранилища, невелико, но при проектировании малых и средних водохранилищ и прудов в засушливых районах, особенно где наблюдаются пыльные бури, необходимо качественно оценить золотой фактор и указать, можно ли ожидать его влияния на процесс заиления.

3. В настоящих рекомендациях рассмотрен комплекс методов, предлагаемых для расчета заиления больших и малых водохранилищ (в том числе и прудов). Даются указания по установлению расчетных величин стока наносов, получению всех исходных величин, необходимых для расчета, и, наконец, излагается методика расчета отложения наносов (в весовом и объемном выражениях) в водоемах.

Следует иметь в виду, что в выполнявшихся до сих пор расчетах заиления основные ошибки в оценке сроков службы водохранилищ были обусловлены неправильным выбором расчетных величин стока наносов и неучетом его изменчивости. Поэтому в настоящих рекомендациях уделяется большое внимание оценке нормы стока наносов, учету его многолетней и внутригодовой изменчивости.

4. В основе рекомендуемых методов расчета заиления водохранилищ и прудов лежит метод баланса наносов. Сущность этого метода очень проста: оценивается сток наносов в начальном створе

водохранилища и в конечном створе, а по их разности определяется количество наносов, удерживаемое в водохранилище за определенный промежуток времени. Вариантами балансового метода являются: 1) теоретические методы, основанные на сопоставлении транспортирующей способности потока в начальном и конечном створах водохранилищ, и 2) методы, основанные на эмпирических соотношениях, позволяющих оценить транзит наносов через водохранилище или же непосредственно его наносоудерживающую способность.

Метод баланса во всех случаях используется для оценки заиления за первый год эксплуатации водохранилища. В специально указанных случаях он применяется для оценки заиления также и каждого последующего года. Упрощенные приемы предусматривают применение экстраполяционных зависимостей, позволяющих по величине заиления за первый год получить заиление за последующие годы и найти продолжительность периода заиления водохранилища.

5. Настоящие рекомендации содержат 17 разделов, в которых изложены указания по подготовке к расчетам и непосредственно по производству расчетов.

Вопросы, достаточно подробно разработанные и освещенные в литературе, изложены весьма кратко; вопросы, не получившие освещения в литературе, рассмотрены несколько полнее. В конце книги приводится список литературы, позволяющей ознакомиться с принципами и подробным изложением помещаемых в рекомендациях методов.

6. Для удобства пользования рекомендуемыми расчетными зависимостями и формулами ниже приводятся принятые обозначения и размерности используемых величин.

Список обозначений основных величин с указанием их размерности

R_r	- средний годовой расход взвешенных наносов, кг/сек.
R_0	- норма годового расхода взвешенных наносов, кг/сек.
$R_{\text{ср.мн}}$	- средний годовой расход взвешенных наносов за многолетний период, кг/сек.
$C_{v,r}$	- коэффициент вариации годового стока взвешенных наносов.
$C_{v,q}$	- коэффициент вариации годового стока воды.
$R_{\text{дн}}$	- расход наносов придонного слоя (расход влекомого наносов), кг/сек.
Q	- расход воды, м ³ /сек.
Q_0	- норма годового стока воды, м ³ /сек.

- Q_p - расход реки, питающей водохранилище, $\text{м}^3/\text{сек.}$
 Q_c - расход стока воды из водохранилища, т.е. расход через створ плотины, $\text{м}^3/\text{сек.}$
 M_k - модуль стока взвешенных наносов, $\text{т}/\text{км}^2$ в год.
 P_r - среднегодовой сток наносов, $\text{т}/\text{год.}$
 P_{ir} - среднегодовой сток наносов i -той фракции, $\text{т}/\text{год.}$
 P_a - годовое количество отложившихся в водоеме наносов, $\text{т}/\text{год.}$
 $\bar{P}_a = \frac{P_r}{P_a}$ - наносоудерживающая способность водоема.
 W - объем водоема, м^3 .
 W_a - годовой объем отложений в водоеме, м^3 .
 W_{a1} - объем отложений в водоеме в первый год эксплуатации, м^3 .
 W_{at} - объем наносов в м^3 , отложившихся в водоеме за t лет.
 $W_{a \text{ пред}}$ - предельная величина объема отложений наносов в водоеме в м^3 , по достижении которой дальнейшее заиление прекращается.
 V_p - годовой объем притока воды в водоем (м^3), принимаемый равным для аридной зоны общему объему паводочного стока реки.
 $V_{акк}$ - емкость водоема, заполняемая в паводок, м^3
 $T_{пав}$ - продолжительность паводочного стока, сек.
 $T_{пз}$ - время полного заиления водоема, годы.
 T_c - продолжительность сброса паводочных вод, сек.
 S - общая мутность воды, $\text{г}/\text{м}^3$.
 S_i - частная мутность, отвечающая содержанию i -той фракции, $\text{г}/\text{м}^3$.
 $S_{тр}$ - средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности, $\text{г}/\text{м}^3$.
 $S_{взм}$ - мутность взмыва, $\text{г}/\text{м}^3$.
 $V_{ср}$ - средняя скорость потока, $\text{м}/\text{сек.}$
 $V_{нат}$ - начальная скорость движения частиц, $\text{м}/\text{сек.}$
 $V_{нат \text{ верх}}$ - скорость массового движения частиц данного размера, $\text{м}/\text{сек.}$
 $V_{отл}$ - скорость, при которой прекращается движение наносов, $\text{м}/\text{сек.}$
 u - средняя гидравлическая крупность транспортируемых наносов, $\text{м}/\text{сек.}$
 u_i - гидравлическая крупность i -той фракции наносов, $\text{м}/\text{сек.}$

- d_{cp} - средний диаметр рассматриваемого состава наносов, м.
 d_i - средний диаметр i -той фракции наносов, м или мм.
 d_{max} - максимальный диаметр перемещаемых наносов, м.
 $\alpha_{gn i} \%$ - процент i -той фракции донных отложений.
 $\alpha_{kzm i} \%$ - процент i -той фракции в составе взвешиваемой части донных отложений; он соответствует процентному содержанию этой фракции в граничном слое потока.
 Γ - гидромеханический параметр наносов по Караушеву [10].
 z - параметр Гостунского [6].
 $G = \frac{u}{v_{cp}}$ - безразмерный параметр, определяемый отношением гидравлической крупности транспортируемой частицы к средней скорости потока.
 C - коэффициент Шези.
 g - 9,81 - ускорение силы тяжести, м/сек².
 γ - удельный вес воды, т/м³ (или кг/м³).
 γ_s - удельный вес наносов, т/м³ (или кг/м³).
 $\gamma_{отл}$ - объемный вес отложений, т/м³ (или кг/м³).
 J - уклон водной поверхности.
 H - средняя глубина потока или водоема на профиле (на участке), м.
 B - ширина потока (водоема), м.
 L - длина водохранилища, м.
 ω_{cp} - средняя величина площади поперечного профиля потока (водоема), м².
 Ω - площадь зеркала водоема, м².
 h - высота ветровой волны, м.
 ℓ - длина волны, м.

П. О ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИСХОДНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПРУДОВ

1. Исходные гидрологические данные, характеризующие режим стока воды и наносов, нормы этих величин, изменчивость в многолетнем разрезе и пр., как отмечается ниже, могут быть получены по материалам достаточно большого периода исследований. Такие данные по ряду рек имеются в материалах Гидрометслужбы. Пути получения исходных данных для расчета заиления при отсутствии материалов непосредственных измерений указаны в разделе IУ и, отчасти, в последующих разделах настоящих рекомендаций.

Если гидрологические данные по стоку наносов недостаточны, следует поставить на одном или нескольких створах реки на участке предполагаемого расположения сооружений и водохранилища специальные измерения стока наносов согласно с действующими наставлениями Гидрометслужбы. Материалы детальных, но кратковременных измерений элементов стока наносов (продолжительность таких работ, как правило, не будет превышать 3-х лет) должны быть увязаны с материалами менее детальных стационарных исследований Гидрометслужбы по данной реке, а при отсутствии таких материалов — с фоновыми характеристиками рассматриваемого гидролого-климатического района. При организации полевых исследований следует обратить особое внимание на изучение гранулометрического состава донных отложений и взвешенных наносов реки.

2. Помимо режимных характеристик, необходимы и локальные характеристики того участка реки, на котором проектируется водохранилище. В частности, такое локальное значение будут иметь данные о гранулометрии наносов, топографические материалы, достаточные для проектирования чаши водохранилища, определения ее объема при характерных уровнях. Должны быть выполнены съемки продольного профиля реки на протяжении всего предполагаемого участка подпора и ниже плотины. При проектировании крупных гидроузлов необходим достаточно подробный материал, который позволил бы построить батиметрические карты проектируемого водохранилища. При отсутствии таких данных выполняется топографическая съемка участка реки до уровня затопляемых отметок от предполагаемого створа плотины до зоны выклинивания подпора.

3. При проектировании прудов следует произвести топографическую съемку предполагаемой чаши пруда. Если водосбор пруда не-

велик, на местности производится маршрутное обследование для получения линии водораздела и приближенной оценки площади водосбора. Ориентировочно оцениваются эрозионные условия водосбора. На реке или временном водотоке, на которых проектируется пруд, следует организовать простейшие гидрологические наблюдения: ежедневные измерения уровня воды и отбор единичных проб на мутность. Отбираются по 2-3 пробы в сутки в период прохождения паводочного стока и по одной в межень. Производится измерение 5-8 расходов воды (преимущественно в период паводка), а также отбор проб на гранулометрический анализ донных отложений (3-6 проб) и взвешенных наносов (2 пробы) в паводок и при более низких уровнях, превышающих, однако, меженные.

III. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРМИРОВАНИИ И РЕЖИМЕ СТОКА НАНОСОВ

I. Реки и ручьи вместе с жидким стоком транспортируют наносы — твердый материал, являющийся продуктом эрозии, т.е. разрушения поверхности водосборного бассейна, а также русел ручьев и рек. Интенсивность эрозии, а вместе с тем и величина стока наносов зависят: 1) от рельефа водосборного бассейна, в первую очередь от величины крутизны склонов бассейна, степени его расчлененности, 2) от величины стока воды и степени его изменчивости во времени, 3) от строения и состава почв и грунтов, слагающих поверхности бассейна, от их защищенности растительным покровом, увлажненности и относительной площади распаханых земель и т.д., 4) от строения гидрографической сети, уклонов русел ручьев и рек, состава покрывающих их наносов.

Изменчивость стока наносов, как правило, очень велика. Часто высокому годовому стоку воды соответствует большой сток наносов, особенно, если многоводность года связана с большим паводочным стоком. Эта общая закономерность нередко нарушается влиянием многих факторов водной эрозии, имеющих иногда местное значение и проявляющихся на режиме стока наносов малых водотоков. На крупных реках решающим в процессе формирования стока наносов является режим жидкого стока, характер развития паводка, т.е. интенсивность нарастания и спада уровней, относительная высота пика паводка, интенсивность и степень затопления поймы.

Решающими факторами формирования и режима стока наносов малых рек и ручьев являются условия на водосборном бассейне (увлажненность почво-грунтов, степень их оттаивания к началу половодья и т.д.).

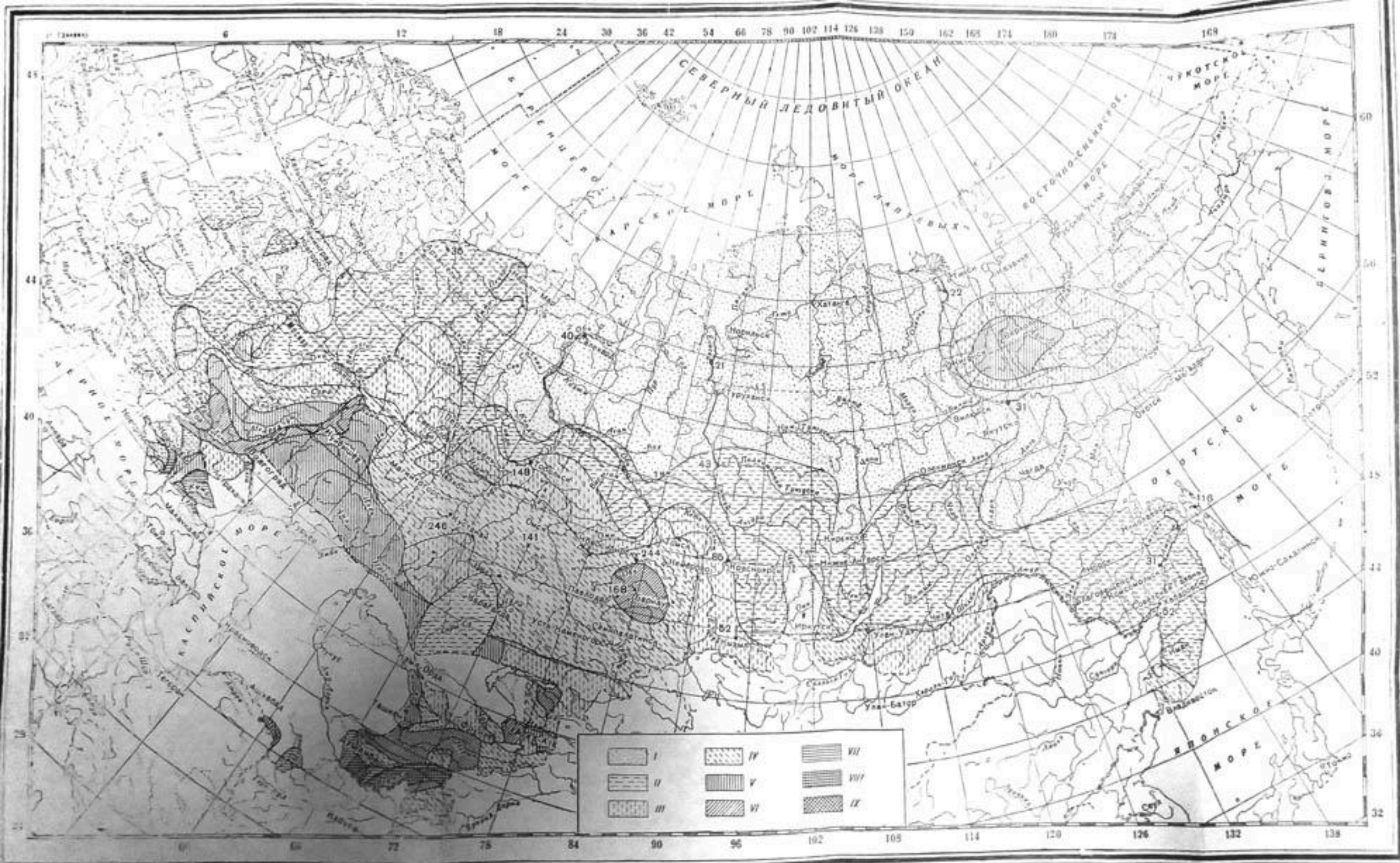


Рис. 1. Карта средней мутности реч. СССР (по Г.И. Ефимову / 34 /).
 I зона - < 25 г/м³; II зона - 25-50 г/м³; III зона - 50-100 г/м³; IV зона - 100-250 г/м³; V зона - 250-500 г/м³; VI зона - 500-1000 г/м³; VII зона - 1000-2500 г/м³; VIII зона - 2500-5000 г/м³; IX зона - > 5000 г/м³.

Исключительно большие различия в величинах расходов наносов наблюдаются внутри года — очень высокие расходы в паводок и обычно пренебрежимо малые в период межени. На малых реках и ручьях резко выражается и суточный ход расходов наносов.

Интенсивность сезонных колебаний стока наносов и изменчивость его годовых величин исключительно велики в условиях засушливых и отчасти горных районов.

2. В горных районах могут быть катастрофические случаи выноса наносов в виде селевых потоков. Проектирование водохранилищ на горных реках должно предусматривать выяснение условий селеносности данного речного бассейна, установление повторяемости селей и хотя бы ориентировочное определение возможных объемов селевых выносов.

3. В условиях равнинных рек транспорт наносов происходит преимущественно во взвешенном состоянии. Доля так называемых влекомых наносов в общем их стоке невелика. Можно думать, более того, что обычно применяемая на реках методика измерения стока взвешенных наносов в условиях русла, сложенного мелким аллювием (в среднем не крупнее песка), позволяет учитывать в основном все транспортируемые потоком фракции. При возрастании уклона речного потока обычно увеличивается процент крупных фракций транспортируемых им наносов. Значительная доля их уже не может быть отнесена к категории взвешенных наносов, хотя бы потому, что не может учитываться применяемыми способами измерения стока взвешенных наносов через мутность. Возможность транспортирования реккой крупнофракционного материала может быть оценена на основании формул начальной скорости влечения и транспорта донных наносов по данным о гранулометрическом составе речного аллювия и по величинам скорости течения. В соответствующих случаях вычисляются расходы наносов крупных фракций (расходы влекомых наносов) и выполняется расчет занесения этими наносами водохранилищ.

IV. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И РАСЧЕТА СТОКА ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ

I. При наличии материалов наблюдений сток взвешенных наносов определяется в створах измерений по фактическим данным, которые публикуются в гидрологических ежегодниках и систематизируются по 1962 г. включительно в таблицах "Основных гидрологических характеристик", издаваемых Гидрометслужбой. Средний многолетний расход взвешенных наносов определяется по зависимости $R_r = f(Q_r)$ с использованием среднего многолетнего расхода воды, поскольку

продолжительность наблюдений за стоком воды обычно превышает период наблюдений за стоком наносов. Точность установления среднего многолетнего расхода зависит от продолжительности ряда наблюдений и от тесноты полученной связи $R_r = f(Q_r)$. В условиях малой изученности стока наносов при продолжительности наблюдений более 10 лет, в которые входят годы с большой водностью и с большим стоком наносов, средний многолетний расход наносов ($R_{ср\text{ мн}}$) считается отвечающим норме расхода наносов (R_0).

2. В случае небольшого периода наблюдений, когда многолетняя амплитуда водности не освещена данными по стоку наносов, но измерениями охвачены средние по водности годы, средняя многолетняя величина расхода определяется из следующего соотношения:

$$\frac{R_{ср}}{R_{ср\text{ мн}}} = \frac{Q_{ср}}{Q_0}, \quad (4, 1)$$

откуда

$$R_{ср\text{ мн}} = \frac{Q_0}{Q_{ср}} R_{ср}; \quad (4, 2)$$

здесь $Q_{ср}$ и $R_{ср}$ — соответственно средние значения расхода воды и взвешенных наносов за период наблюдений. Однако, если период наблюдений маловодный, то средний многолетний расход наносов определить нельзя. В этом случае он, как и в случае отсутствия данных измерений, получается по карте мутности. При неоднозначности зависимости $R_r = f(Q_r)$, что может быть связано с многолетней изменчивостью стока наносов, среднее многолетнее значение расхода наносов определяется по осредненной линии связи, а его возможные отклонения — по огибающим. Рекомендации по установлению расчетных величин стока наносов с учетом многолетней его изменчивости изложены ниже.

3. При отсутствии данных наблюдений средняя многолетняя мутность воды неизученных рек с площадью водосбора от 500 км² до 20 тыс. км² определяется по карте мутности воды Г.И. Шамова (рис. 1).

В издаваемых в настоящее время Гидрометслужбой справочниках даются уточненные карты мутности для отдельных территорий, составленные с учетом данных наблюдений за последние 10–15 лет. При расчете средней многолетней мутности воды неизученных рек этих территорий следует отдавать предпочтение картам справочников, так как карты Г.И. Шамова и Г.В. Лопатина основаны на материалах наблюдений лишь по 1952 г. Опуоликованные региональные карты мутности или параметров, характеризующих сток наносов, приведены в настоящих рекомендациях, а именно для Украины (рис. 2), Крыма (рис. 3), Киргизии (рис. 4), Таджикистана (рис. 5), по территории Армении (рис. 6) и Северного Казахстана (рис. 7).

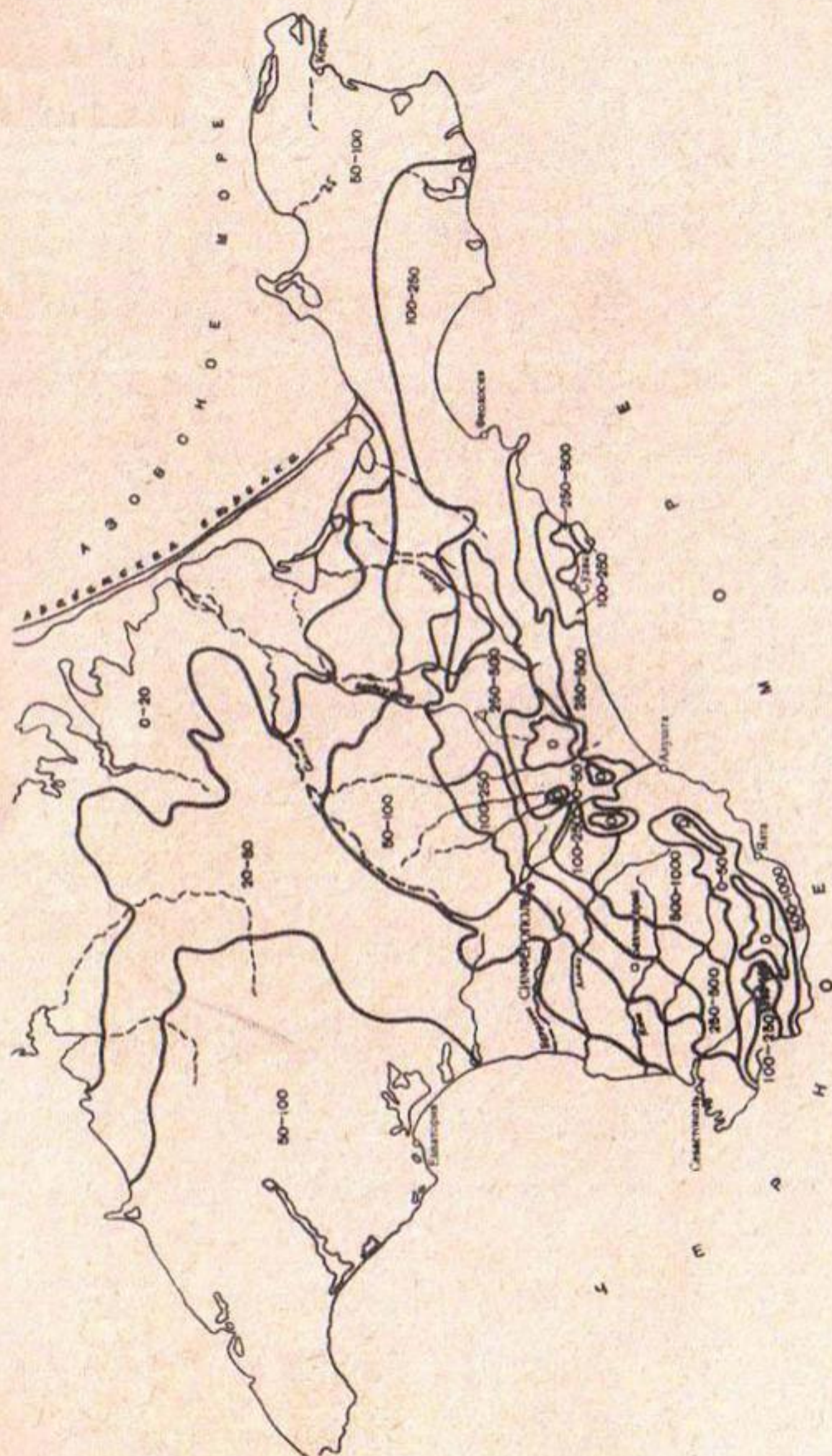


Рис. 3. Карта средней мутности (г/м^3) рек и водотоков Крыма (по Н.И. Дрозду).

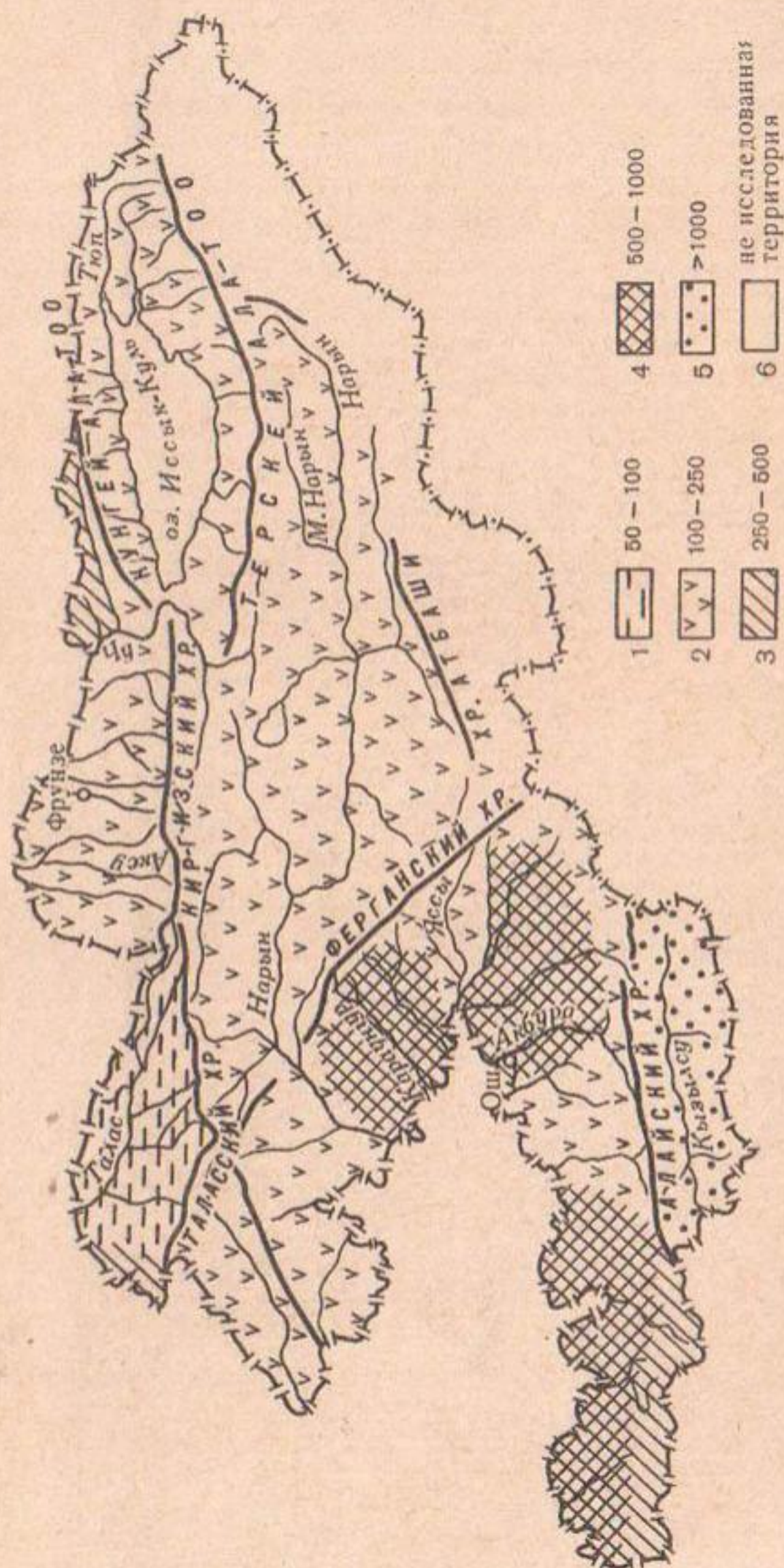


Рис. 4. Карта средней мутности (г/м³) рек Киргизской ССР (по Ю.Ф. Кузнецовой [13]).

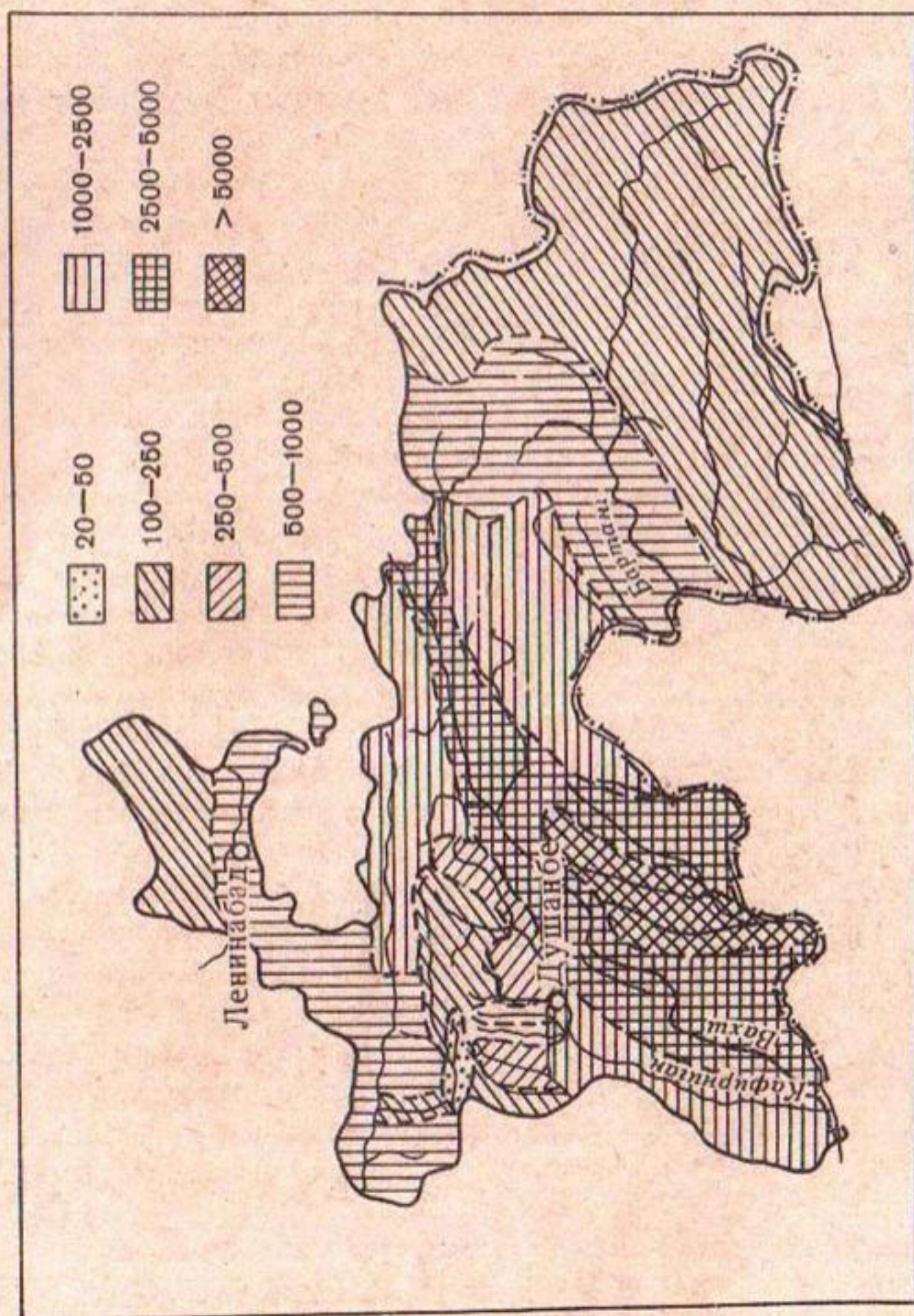


Рис. 5. Карта средней мутности (г/м^3) рек Таджикистана по В. В. Головину [4].

Средняя многолетняя мутность неизученной реки принимается по карте равной среднему значению мутности зоны, в которой она протекает. Средний многолетний расход наносов вычисляется путем умножения средней многолетней мутности на средний годовой расход воды за многолетний период. Средний многолетний расход воды выписывается из таблицы, помещенной в приложении к книге К.П. Воскресенского "Норма и изменчивость годового стока рек СССР" [2], а при отсутствии измерений эта величина определяется по картам среднего годового стока рек СССР, которые прилагаются к упомянутой книге.

4. Мутность крупных рек с площадью бассейна более 20 тыс. км² не определяется по карте в виду того, что она является интегральной характеристикой эрозии всего водосбора, который может охватывать различные зоны мутности. В этих створах расходы наносов получаются по интерполяции между выше и ниже расположенными пунктами измерений расходов наносов с учетом расходов, поступающих от притоков. В случае, когда приток впадает в реку непосредственно выше расчетного створа, но ниже створа измерений, расход наносов определяется суммой расходов наносов притока и основной реки. Определение расхода наносов для неизученного створа реки по интерполяции между выше и ниже расположенными створами правомерно в том случае, если участок реки между створами измерений морфологически однороден (продольный профиль реки не имеет резких переломов, размеры русла и поймы, а также состав слагающих их грунтов не меняются). В противном случае могут быть заметные изменения среднего многолетнего расхода наносов и его величин в отдельные годы, что связано с процессами размыва русла или осаждения наносов на рассматриваемом участке реки.

5. По территориям бассейна р. Аму-Дарьи [21] и Северного Казахстана расчет мутности и стока наносов неизученных рек выполняется по формулам, в которых учитываются основные факторы водной эрозии: продольный уклон или уклон водосбора (падение реки или высота бассейна), а также эрозионные коэффициенты (α или A). Эрозионные коэффициенты зависят главным образом от состава почв и пород в бассейне; они районированы по вышеуказанным территориям. Такой способ расчета оказывается более точным, чем определение мутности по среднему ее значению на карте.

6. Для бассейна Аму-Дарьи используется формула вида $S = f(\alpha N)$, но эрозионный коэффициент α_c определяется, исходя из равенства

$$R_r = \alpha_c N^{1,22} \quad (4, 3)$$

Этот коэффициент выражает интенсивность выноса взвешенных наносов с 1 км^2 площади водосбора, приходящуюся на условную единицу потенциальной энергии стекающих вод ($N_{\text{г.м}}$), где $N = QH$; Q - средний расход воды, $\text{м}^3/\text{сек.}$, H - средневзвешенная высота водосбора над уровнем расчетного створа, м.

Расход наносов неизученной реки подсчитывается по выражению (4, 3), причем α_c находится по карте В.П. Светицкого [21], Q устанавливается изложенными выше способами, H определяется по гипсометрической карте бассейна.

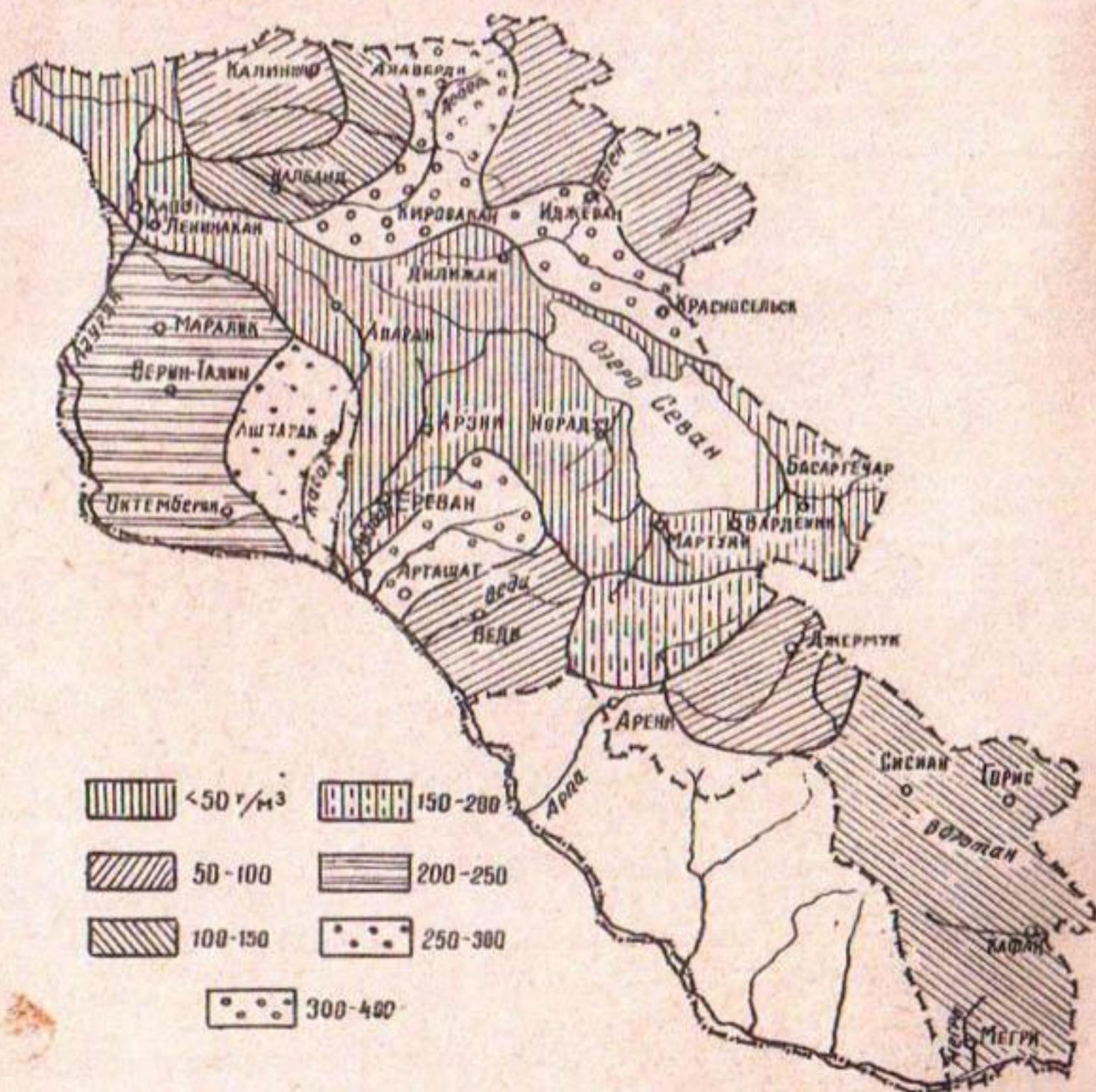


Рис. 6. Карта средней мутности (г/м^3) рек Армении (по Г.Н. Хмаладзе [22]).

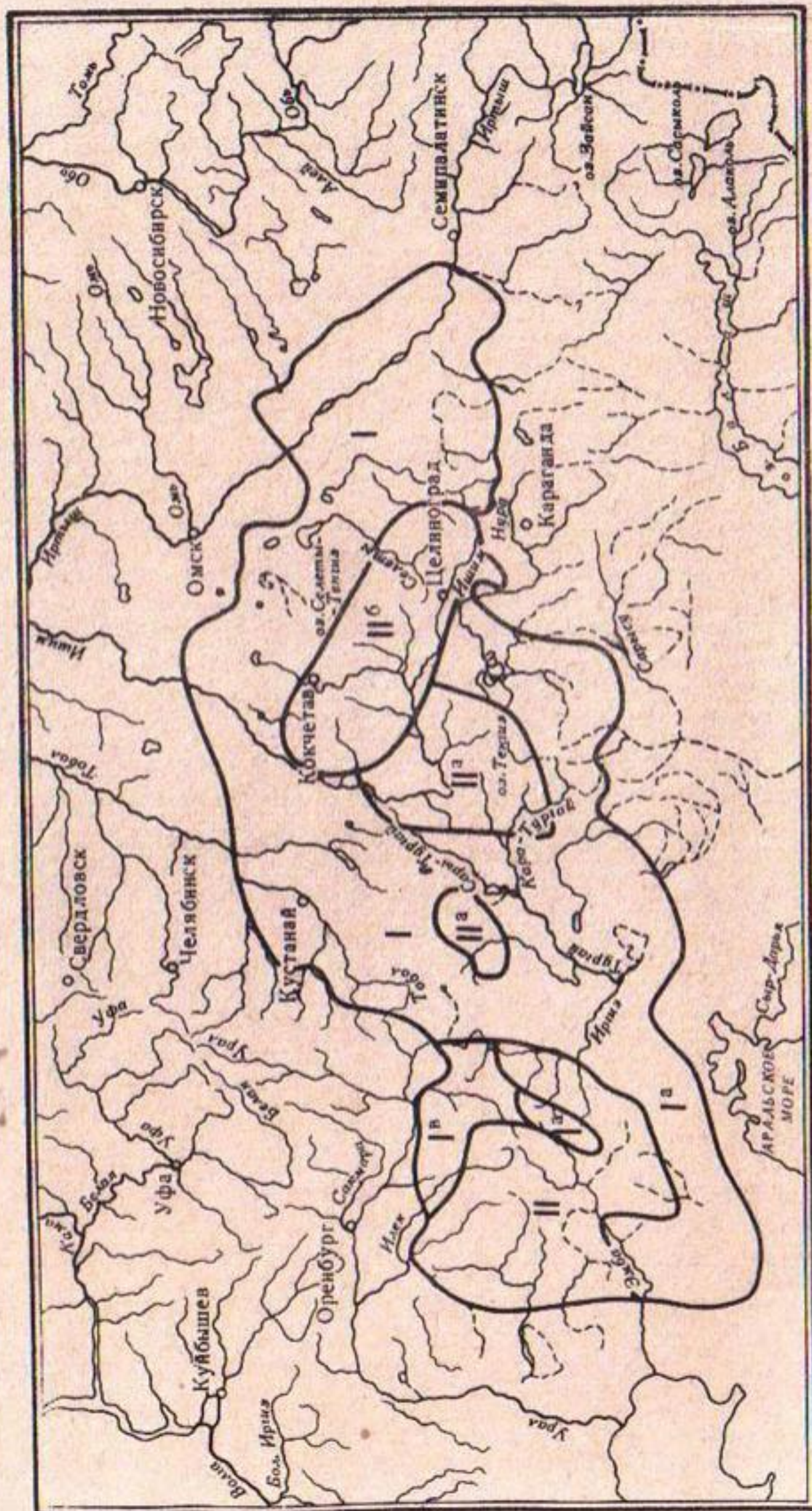


Рис. 7. Схема районирования эрозийного коэффициента A (т/км² в год) по территории Северного Казахстана (по К. Н. Лисицкой [17]). Ia - 0,6 - 1,2; Ib - 1,0 - 2,0; Ic - 1,5 - 3,0; Id - 3-5; Ie - 5-7; If - 10 - 16.

7. Для определения стока наносов рек Северного Казахстана рекомендуется формула

$$M_n = A J \cdot 10^3, \quad (4, 4)$$

в которой эрозионный коэффициент A является модулем стока наносов (t/km^2 в год) при средневзвешенном продольном уклоне русла 0,001. Значения эрозионного коэффициента, полученные для различных зон мутности, изменяются по территории от 0,9 до 16 (рис. 7). При наличии сведений о составе почво-грунтов на водосборе реки значения A можно рассчитать по формуле

$$A = 3,2 \cdot 10^{-8} B J_e^{2,5}, \quad (4, 5)$$

где J_e – средневзвешенный уклон водосбора; коэффициент B определяется в зависимости от состава почво-грунтов по данным табл. 1.

8. Для определения мутности малых водотоков (S_m), с площадью водосбора менее $200 km^2$, применяются поправочные коэффициенты к мутности зоны на карте (S_z) в виде $S_m = k_n \cdot S_z$. Поправочные коэффициенты k_n , полученные на основании данных обследования заиления прудов, установлены для водотоков ЦЧО, Украины и Северного Казахстана. Сводка их приведена в табл. 2. Для других территорий данные о коэффициенте k_n отсутствуют, поэтому вычисления могут носить лишь характер предварительных прикидок и основываются на аналогии с бассейнами рек изученных территорий.

Таблица I

Значения коэффициента B для рек Северного Казахстана
(по исследованиям К. Н. Лисицкой [17])

Характеристика почво-грунтов	Значение коэффициента B
Щебнистые	0,02
Супесчаные или суглинистые с наличием щебня	0,08
Преимущественно суглинистые, встречаются супесчаные	0,29
Суглинистые	1,63

Таблица 2

Поправочные коэффициенты (K_n) к мутности рек,
определяемой по карте

Площадь водосбора, км ²	Территория		
	Центральные черноземные области (К.П. Воскре- сенский [3])	Украина (Н.И. Дрозд [7])	Северный Казах- стан (К.Н. Ли- сицына [17])
< 2	30	30	40
5	15	15	20
10	10	10	13
50	5	5	5
100	3	-	3
≥ 200	1	-	1
≥ 1000	1	1	1

9. Для расчета заилнения водохранилищ необходимы также сведения по гранулометрическому составу взвешенных наносов и донных отложений.

При наличии материалов наблюдений характеристики гранулометрического состава взвешенных наносов и донных отложений определяются в створах измерений по фактическим данным, которые публикуются в гидрологических ежегодниках и систематизируются по 1962 г. включительно в таблицах "Основных гидрологических характеристик".

10. При отсутствии данных наблюдений по гранулометрическому составу взвешенных наносов его приближенную характеристику можно получить по схематической карте крупности взвешенных наносов, составленной Г.И. Шамоным для рек Европейской территории СССР, Кавказа и Средней Азии (рис. 8). Для других территорий таких обобщений не имеется, поэтому состав взвешенных наносов и донных отложений неизученных рек, на которых проектируются водохранилища, необходимо изучить в период подготовки к проектированию или же на начальной стадии проектирования.

У. УЧЕТ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГОДОВОГО СТОКА НАНОСОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЗАИЛЕНИЯ

1. Выше указывалось, что сток наносов отличается значительной изменчивостью в многолетнем разрезе. Многолетняя изменчивость стока наносов или среднегодовых значений расходов наносов учитывается при расчете заиления лишь в тех случаях, когда общая продолжительность заиления водохранилища (согласно предварительной прикидке) оказывается относительно небольшой. При больших сроках заиления расчет ведется только по среднему многолетнему значению расхода (стока) наносов. Ниже везде будет говориться не о стоке, а о расходах наносов, т.к. именно этой величиной наиболее удобно пользоваться при расчете заиления, учитывающем изменчивость стока наносов.

Критерий для решения вопроса о целесообразности учета многолетней изменчивости среднегодовых расходов наносов является различным для разных физико-географических условий. Для аридных и горных районов многолетняя изменчивость не учитывается, если предварительный расчет, выполненный по норме стока наносов, дает срок полного заиления, превышающий 25-30 лет. Для равнинных рек зон обычного и повышенного увлажнения изменчивость не учитывается, если продолжительность полного заиления получается более 15-20 лет. Если сроки заиления оказываются меньше, то многолетняя изменчивость обязательно учитывается.

2. Изменчивость среднегодовой величины расхода наносов в многолетнем разрезе характеризуется коэффициентом вариации C_{vr} этой величины. При наличии данных многолетних измерений стока наносов C_{vr} может быть получен при использовании следующей известной формулы непосредственно по ряду среднегодовых величин:

$$C_{vr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_{ri} - 1)^2}{n - 1}}, \quad (5, 1)$$

где n - число членов ряда, равное числу лет наблюдений за стоком наносов, а k_{ri} - модульный коэффициент среднегодового расхода наносов данного (i -того) года, определяемый следующим соотношением:

$$k_{ri} = \frac{R_{ri}}{R_0}; \quad (5, 2)$$

здесь R_{ri} - среднегодовой расход наносов, R_0 - норма расхода наносов. Об установлении нормы расхода наносов сказано выше, в разделе IV.

3. При недостаточной продолжительности измерений стока наносов или отсутствии измерений значение C_{vR} определяется приближенно по аналогии с другими реками, имеющими длинные ряды наблюдений и характеризующимися одинаковыми физико-географическими условиями бассейнов и близкой по величине площадью водосборов. Если и эти данные отсутствуют, то для получения C_{vR} применяются следующие приближенные формулы Г.В. Лопатина [18]:

для равнинных рек

$$C_{vR} = 1,6 C_{vQ}, \quad (5,3)$$

для горных рек

$$C_{vR} = 3,3 C_{vQ}, \quad (5,4)$$

для рек промежуточного типа

$$C_{vR} = 2,2 C_{vQ}; \quad (5,5)$$

здесь C_{vQ} - коэффициент вариации среднегодовых величин расходов воды.

Некоторые весьма ограниченные данные ГГИ позволяют ориентировочно принять для рек аридных зон $C_{vR} = 1,5 \div 3,0$.

4. По найденному значению C_{vR} при использовании таблицы ординат интегральных кривых распределения (табл. 3) составляют таблицу кривой обеспеченности модульных коэффициентов среднегодовых величин расходов наносов k_R . Умножая значения k_R на R_0 или на средний многолетний расход наносов (принимаемый за норму R_0), получают среднегодовые расходы наносов R_r , отвечающие определенным значениям обеспеченности, и строят интегральную кривую распределения R_r .

5. Процесс заиления водохранилищ зависит не только от величины и изменчивости стока наносов, но и от последовательности расположения лет с большими и малыми R_r . Заиление наиболее интенсивно, если первые годы эксплуатации водохранилища будут характеризоваться большими R_r . Для учета последовательности значений R_r привлекаются данные о цикличности стока наносов. При отсутствии достаточных данных для учета цикличности по рассматриваемой реке используются сведения по реке-аналогу.

6. Весь цикл, включающий годы с большим и малым R_r , делится на 3-4 периода с разными R_r . Например, можно выделить периоды с весьма высоким стоком наносов ($n_{вв}$ лет), с высоким стоком наносов ($n_{в}$ лет), со средним стоком наносов ($n_{с}$ лет) и с низким стоком наносов ($n_{н}$ лет). Если через N обозначить число лет, охватываемых в среднем одним циклом, то, очевидно, что

$$N = n_{вв} + n_{в} + n_{с} + n_{н}. \quad (5,6)$$

Ординаты интегральных
 $C_s : C_v = 2,0$ (бино

P%	C_v											
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
0,1	1,34	1,73	2,12	2,70	3,27	3,89	4,57	5,30	6,08	6,91	7,76	8,65
1	1,25	1,52	1,83	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,61	5,06	5,50
5	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	3,00	3,21	3,45
10	1,13	1,26	1,40	1,53	1,67	1,81	1,94	2,06	2,19	2,30	2,41	2,50
20	1,08	1,16	1,24	1,31	1,38	1,44	1,49	1,54	1,58	1,61	1,62	1,62
30	1,05	1,09	1,13	1,17	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20	1,18	1,13
40	1,02	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	0,99	0,96	0,92	0,87	0,81
50	1,00	0,99	0,97	0,95	0,92	0,88	0,84	0,80	0,75	0,69	0,64	0,58
60	0,97	0,94	0,90	0,85	0,80	0,75	0,69	0,63	0,57	0,51	0,45	0,40
70	0,95	0,89	0,82	0,76	0,69	0,62	0,55	0,49	0,42	0,36	0,31	0,26
80	0,92	0,83	0,75	0,66	0,57	0,49	0,42	0,35	0,28	0,22	0,17	0,13
90	0,87	0,75	0,64	0,53	0,44	0,35	0,27	0,21	0,15	0,11	0,07	0,05
95	0,84	0,70	0,56	0,45	0,34	0,25	0,18	0,13	0,08	0,05	0,03	0,02
99	0,78	0,59	0,44	0,31	0,21	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00
99,9	0,72	0,49	0,32	0,19	0,11	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 3

кривых распределения
миальная кривая)

[illegible]

Далее находятся средние для каждого периода значения K_r и отвечающая им обеспеченность.

Выбрав расчетные значения K_r для интервалов, необходимо проверить, получается ли в сумме за все годы расчетных циклов норма расхода наносов K_o .

Проверка ведется по формуле

$$K_o = \frac{\sum_{i=1}^k n_i K_i}{N}, \quad (5,7)$$

где i — обозначает номер периода в цикле, k — число периодов в цикле, N — число лет в цикле.

Если получаемая по этой формуле величина K_o не совпадает с принятой в расчете нормой, то надо так изменить обеспеченности K , а следовательно, и сами величины, чтобы добиться совпадения.

7. Для выделенных периодов цикла назначаются расходы воды Q . Предварительно необходимо выяснить какова корреляция между годовыми величинами K_r и Q_r . Наиболее неблагоприятные условия заиления создаются в водохранилищах именно при отсутствием корреляции между этими величинами. Большой сток воды, сопровождающийся сбросом, способствует выносу части наносов в нижний бьеф. В случае наличия корреляции при возрастании поступления наносов в водохранилище возрастает и вынос из него. Наиболее интенсивное заиление должно наблюдаться в годы с особенно высоким стоком наносов при относительной маловодности, т.к. в этом случае возрастает аккумулятивная составляющая баланса наносов водохранилища и убывает расходная составляющая.

При наличии достаточно длинных рядов наблюдений коэффициент корреляции γ вычисляется по формуле

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Q_i \Delta R_i}{n \sigma_Q \cdot \sigma_R}, \quad (5,8)$$

где $\Delta Q_i = Q_i - Q_{cp}$ и $\Delta R_i = R_i - R_{cp}$; n — число лет (число членов ряда); через i обозначен порядковый номер лет, располагаемых в таблице в хронологической последовательности;

Q_{cp} и R_{cp} — соответственно средние за n лет значения среднегодовых расходов воды и наносов; σ_Q и σ_R — средние квадратичные отклонения Q и R за n лет. Они определяются

по формулам
$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Q_i^2}{n-1}}, \quad (5,9)$$

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta R_i^2}{n-1}}. \quad (5,10)$$

Если коэффициент корреляции между R_r и Q_r больше 0,65, то считается, что имеется прямая зависимость R_r от Q_r . Если указанный коэффициент меньше 0,65, то величина R_r считается независимой от Q_r . При обнаружении зависимости R_r от Q_r , величина Q_r для каждого периода, выделенного внутри цикла, устанавливается по кривой обеспеченности Q_r согласно найденной для соответствующего периода обеспеченности величине R_r . В том случае, когда обнаруживается независимость R_r от Q_r , для каждого периода расход воды принимается равным среднему многолетнему его значению.

8. Расчет заиления при учете многолетней изменчивости стока наносов выполняется при принятии наиболее неблагоприятной последовательности лет с различными значениями стока наносов. В этом заключается главный смысл учета цикличности. Внутри цикла расчетные периоды располагаются в порядке убывания стока наносов (средних годовых расходов наносов). Такой прием позволит учесть возможность весьма интенсивного заиления в первые годы эксплуатации водохранилища.

VI. УЧЕТ ВНУТРИГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА ВОДЫ И НАНОСОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

1. Прежде чем приступить к расчету заиления, необходимо рассмотреть водный режим проектируемого водохранилища и питающей его реки. В случае, если предварительные вычисления показали, что расчет может вестись только по норме стока наносов, без учета его многолетней изменчивости, для выполнения окончательного расчета заиления используются только значения нормы стока воды и наносов. Выбирается типовой год по гидрографу $Q(t)$ и графику расходов наносов $R(t)$, характеризующийся как достаточно полным отражением характерного для рассматриваемого створа реки хронологи-

ческого хода расходов воды и наносов, так и близость годового стока воды и наносов к норме. Если не удастся найти такой год, который был бы типовым как по стоку воды, так и по стоку наносов, выбирают различные годы: один — характерный по стоку воды, а другой — по стоку наносов.

2. Значения стока воды и стока наносов характерных лет и хронологические графики $Q(t)$ и $R(t)$ должны быть приведены соответственно к нормам стока воды $Q_0 T$ (где Q_0 — норма расхода воды, T — число секунд в году) и стока наносов $R_0 T$ (R_0 — норма расхода наносов). Приведение выполняется путем умножения ординат графиков $Q(t)$ и $R(t)$ на поправочные множители K_Q и K_R , находящиеся из соотношений

$$K_Q = \frac{Q_0 T}{\int_0^T Q(t) dt} \quad (6,1)$$

и

$$K_R = \frac{R_0 T}{\int_0^T R(t) dt} \quad (6,2)$$

Интегрирование графиков производится путем планиметрирования или подсчета по трапециям.

Исправленные графики строят на основании равенств

$$\left. \begin{aligned} Q_{испр}(t) &= K_Q Q(t) \\ R_{испр}(t) &= K_R R(t) \end{aligned} \right\} \quad (6,3)$$

При отсутствии для рассматриваемой реки достаточных данных для построения таких графиков пользуются графиками по реке-аналогу.

3. Обозначим через Q_p — расход реки, питающий водохранилище, а через Q_c — расход воды через замыкающий створ водохранилища, т.е. через сооружения (расход стока из водохранилища).

Если для какого-либо периода времени (сезон) характерны очень малые значения стока наносов, практически приближающиеся к нулю, то этот период полностью исключается из расчетного. Разделим год, за вычетом периода нулевого стока наносов по типовому (исправленному) гидрографу, на расчетные интервалы; при этом выделим: 1) интервал, отличающийся превышением расхода реки над стоком из водохранилища, т.е. $Q_p > Q_c$; 2) интервал, характеризующийся превышением второй величины над первой, т.е. $Q_p < Q_c$; 3) в некоторых случаях может быть выделен интервал, характеризую-

щийся приближенным равенством $Q_p \cong Q_c$ (рис. 9). Если внутри какого-либо из этих интервалов очень велика изменчивость стока воды или наносов, то такой интервал следует разделить на части; однако надо иметь в виду, что увеличение числа расчетных интервалов, хотя и повышает точность расчета, но приводит к значительному увеличению трудоемкости вычислений. Оптимальным числом расчетных интервалов, на которые делится типовой год, следует считать 3-4.

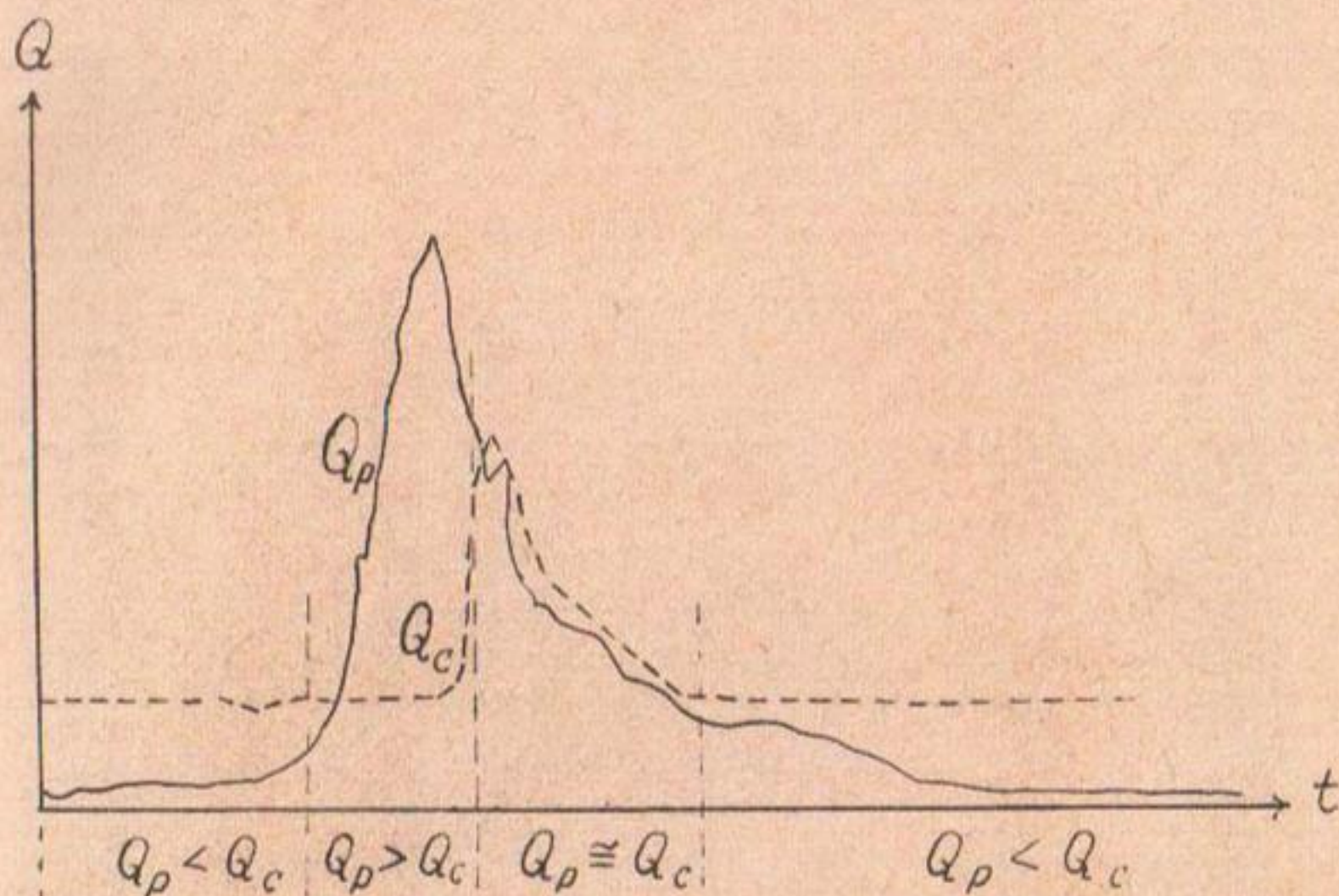


Рис. 9. Схема выделения расчетных интервалов по типовому гидрографу стока воды.

4. Остановимся теперь на вопросе о назначении расходов стока из водохранилища и построении гидрографа стока. Это осуществляется на основании данных гидравлических расчетов сооружений и водохранилища. Могут быть, однако, выполнены и приближенные построения, основанные на использовании среднегодового значения расхода воды через сооружения.

5. Перед весенним половодьем всегда имеет место неравенство $Q_p < Q_c$. Процесс опорожнения водохранилища продолжается и перед паводком. Пусть к началу половодья средняя многолетняя сра-

ботка водохранилища, считая от НПУ, оказалась равной h_c ; тогда произведение $h_c \Omega$ (где Ω — зеркало водохранилища при уровне $-\frac{h_c}{2}$) с достаточной для рассматриваемой задачи точностью характеризует ту емкость водохранилища, которая должна быть заполнена, прежде чем начнется холостой сброс. Сток из водохранилища Q_c разделим на полезный и холостой (расходы Q_{cp} и Q_{cx}). Холостой сброс не будет иметь место до тех пор, пока не осуществится равенство

$$\int_0^{t_n} Q_{испр}(t) dt - Q_{cp} t_n = h_c \Omega. \quad (6,4)$$

Из этого равенства легко определяется t_n , т.е. период наполнения. С момента времени t_n начинает действовать холостой сброс. При делении года на достаточно большие интервалы времени Δt (которые будем именовать внутригодовыми расчетными интервалами или просто расчетными интервалами) в порядке приближения можно принять, что для расчетного интервала, начало которого совпадает с началом холостого сброса, средний расход стока из водохранилища равен среднему расходу притока за тот же интервал времени. Конец холостого сброса отвечает равенству Q_p и Q_{cp} , а продолжающееся далее уменьшение Q_p приводит к условию $Q_p < Q_{cp}$, при котором начинается опорожнение водохранилища.

Как видим, год, начало которого лучше считать с начала половодья, должен быть разделен по крайней мере на 3 расчетных интервала Δt разной продолжительности. Для рек с очень большим различием паводочных и меженных расходов может быть выделен еще один расчетный интервал, охватывающий период наиболее значительных расходов паводка. Этот интервал выделяется из первого (период наполнения) или второго (период холостого сброса), в зависимости от того, когда проходят наибольшие расходы воды.

6. Для каждого расчетного интервала определяются средние значения расходов воды притока и стока и средние значения исправленных расходов наносов [формулы (6,3)]. Эти данные являются исходными при расчете заиления водохранилища.

7. Рассмотрим теперь случай учета многолетней изменчивости стока наносов при расчете заиления водохранилища. В этом случае изложенный в настоящем разделе способ анализа внутригодовой изменчивости стока воды и наносов применяется к типовым графикам $Q(t)$ и $R(t)$, построенным для лет с различной обеспеченностью стока наносов, выделенных, например, согласно грациям, указанным в предыдущем разделе (годы N_{88} , N_8 , N_c и N_n).

Если при этом принимается наличие корреляции между стоком наносов и воды, то при выборе типовых гидрографов учитывается, что обеспеченность стока воды этих лет должна соответствовать заданной обеспеченности стока наносов. Если принимается, что корреляция между стоком наносов и воды отсутствует, то для стока наносов выбираются (или строятся) при учете зависимостей (6,3) хронологические графики, отдельно для лет $n_{\text{св}}$, $n_{\text{в}}$, $n_{\text{с}}$ и $n_{\text{н}}$, характеризующихся значениями годового стока наносов различной обеспеченности, а для стока воды принимается один гидрограф, отвечающий норме стока воды.

Вопрос об использовании подготовленного таким образом материала рассматривается в разделах XII–XIII, посвященных расчету заиления для одного года или одного цикла (последнее при учете многолетней изменчивости стока наносов).

УП. ВЫЧИСЛЕНИЕ ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОТОКА И РАСХОДА НАНОСОВ

I. Во всех случаях, когда выполняется детальный расчет заиления водохранилищ, приходится иметь дело с транспортирующей способностью потока как в пределах водохранилища, так и выше зоны подпора. Расчетные формулы транспортирующей способности должны быть увязаны с фактическими значениями расходов наносов реки, на которой образовано водохранилище, или с принимаемыми на основании тех или иных соображений значениями расходов наносов. Такая увязка выполняется путем введения в формулу корректирующего множителя

α , который позволяет максимально приблизить расход наносов, полученный по формуле транспортирующей способности, к истинному расходу наносов данной реки при том или ином конкретном состоянии ее режима. Для каждого состояния реки может вводиться особое значение множителя α . Такой прием основывается на следующей схеме процесса: принимается, что до создания водохранилища односторонние деформации русла реки (намывы или размывы) отсутствовали и фактический расход наносов реки в каждую фазу режима равнялся ее транспортирующей способности. Используя затем формулу транспортирующей способности с множителем α для участков водохранилища и учитывая постепенное осаждение наносов, получают возможность выяснить интенсивность процесса заиления на каждом участке, связанного только с созданием подпора.

2. При наличии достаточных натуральных данных о расходах наносов реки в формулу транспортирующей способности вводится попра-

вочный коэффициент a , который находится из соотношения

$$a = \frac{S_{j \text{ узм}}}{S_{j \text{ выг}}} \quad (7,1)$$

или

$$a = \frac{R_{j \text{ узм}}}{R_{j \text{ выг}}} \quad (7,2)$$

В этих соотношениях используются средние для расчетного интервала времени (j -того) измеренные и вычисленные значения мутности или расхода взвешенных наносов для одного и того же промежутка времени.

При отсутствии данных непосредственных измерений производится увязка вычисленных по формуле транспортирующей способности значений мутности или расхода наносов с принятыми значениями этих величин (см. разделы IY и Y). Поправочный множитель находится по формуле

$$a = \frac{R_{j \text{ пр}}}{R_{j \text{ выг}}} ; \quad (7,3)$$

здесь $R_{j \text{ пр}}$ — принятое значение расхода наносов.

3. Важнейшей характеристикой транспорта наносов и их осаждения в водохранилищах является механический (гранулометрический) состав наносов, выражаемый процентным содержанием отдельных фракций, размеры которых задаются геометрической величиной (средний диаметр частиц фракции d) или гидравлической крупностью фракции u . Связь между диаметрами частиц и их гидравлической крупностью задана данными табл. 4, которая составлена по материалам обширных экспериментальных исследований и является более совершенной, чем таблица, помещенная в Наставлении гидрометеорологических станциям и постам, вып. 6, ч. I.

4. Таблица 4 не может применяться для расчета, если данные о гранулометрическом составе берутся из гидрологических ежегодников или других материалов Гидрометслужбы.

В этих случаях при обработке материалов используется другая таблица (табл. 5), заметно отличающаяся от табл. 4.

Необходимость пользования в рассматриваемых случаях данными табл. 5 обусловлена тем, что именно по этой таблице осуществляется переход от гидравлической крупности u , получаемой в лабораториях Гидрометслужбы, к геометрическому размеру частиц (диаметру d). Естественно поэтому, что и обратный переход от d к u , следует производить по табл. 5. По этой таблице гидравлическая крупность частиц получается при температуре воды 15° , при которой обычно производятся анализы в лабораториях. Для перехода от u при

Таблица 4

Значения гидравлической крупности частиц ¹⁾

Ламинарная и переходная области падения частиц

Диаметр частицы d мм	Гидравлическая крупность u (м/сек.) при температуре			
	от 5 до 8°	от 9 до 12°	от 13 до 16°	от 17 до 20°
0,005	0,0000105	0,0000125	0,0000140	0,0000165
0,0075	0,0000237	0,0000277	0,0000316	0,0000362
0,010	0,0000420	0,0000490	0,0000560	0,0000630
0,015	0,0000960	0,000111	0,000128	0,000144
0,020	0,000167	0,000193	0,000222	0,000250
0,025	0,000265	0,000315	0,000363	0,000414
0,030	0,000400	0,000468	0,000536	0,000610
0,040	0,000716	0,000832	0,000946	0,00108
0,050	0,00107	0,00125	0,00141	0,00161
0,075	0,00250	0,00308	0,00350	0,00420
0,10	0,00410	0,00500	0,00575	0,00640
0,15	0,0078	0,0082	0,0105	0,0120
0,20	0,0131	0,0150	0,0175	0,0192
0,30	0,0250	0,0277	0,0317	0,0345
0,40	0,0370	0,0405	0,0445	0,0485
0,50	0,0480	0,0528	0,0568	0,0608
0,60	0,0598	0,0642	0,0682	0,072
0,70	0,0710	0,0755	0,0800	0,0840
0,80	0,0815	0,0862	0,0908	0,0954
0,90	0,0912	0,0968	0,1012	0,1063
1,00	0,100	0,106	0,111	0,117

Турбулентная область падения частиц

Диаметр частицы d мм	Гидравли- ческая крупность u м/сек.	Диаметр частицы d мм	Гидравли- ческая крупность u м/сек.	Диаметр частицы d мм	Гидравли- ческая крупность u м/сек.
1,2	0,126	4,5	0,284	15,0	0,52
1,4	0,144	5,0	0,294	20,0	0,63
1,6	0,160	6,0	0,323	30,0	0,78
2,0	0,184	7,0	0,347	40,0	0,92
2,5	0,210	8,0	0,370	50,0	1,06
3,0	0,234	9,0	0,393	60,0	1,17
3,5	0,254	10,0	0,42	70,0	(1,28)
4,0	0,269	12,0	0,44	80,0	(1,39)

Примечание. В верхней части кривой $u=f(d)$ недостаточно точек, поэтому вверх от точки $d = 70$ мм функцию $u=f(d)$ следует считать не вполне надежной (эти значения даны в скобках).

¹⁾ Таблица составлена в ГГИ по материалам исследований Б.В. Архангельского, А.П. Лапшина и В.В. Романовского.

$t = 15^{\circ}$ к гидравлической крупности, отвечающей любой другой температуре, даются переходные поправочные коэффициенты (табл. 6). Умножение получаемого по табл. 5 значения гидравлической крупности на приведенный в табл. 6 коэффициент дает гидравлическую крупность частицы, соответствующего размера (d) при взятом значении температуры.

Таблица 5

Значения гидравлической крупности частиц
при температуре воды 15° I)

d мм	u м/сек.	d мм	u м/сек.
0,001	0,0000008	0,1	0,008
0,005	0,00003	0,2	0,021
0,01	0,00008	0,5	0,060
0,05	0,002	1,0	0,100

I) Эта таблица взята из Наставления гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 6, ч. I.

Таблица 6

Температурные поправочные коэффициенты к гидравлической
крупности, измеренной при $t = 15^{\circ}$, для частиц различ-
ного диаметра

d мм	$0-4^{\circ}$	$5-8^{\circ}$	$9-12^{\circ}$	$13-16^{\circ}$	$17-20^{\circ}$
1,0	0,83	0,90	0,95	I	1,04
0,5	0,74	0,84	0,92	I	1,07
0,2	0,68	0,80	0,89	I	1,10
0,1	0,66	0,78	0,86	I	1,12
0,05	0,66	0,77	0,85	I	1,15
0,01	0,66	0,77	0,85	I	1,15
0,005	0,66	0,77	0,85	I	1,15

Данные табл. 6 получены на основании таблицы гидравлической крупности (табл. 4).

Следует иметь в виду, что гидравлический метод анализа наносов применяется для частиц диаметром менее 1 мм; более крупные

— анализируются на ситах, поэтому для наносов крупнее 1 мм при использовании данных Ежегодника необходимо пользоваться непосредственно табл. 4.

5. Для расчета транспортирующей способности потока рекомендуется формула А.В. Караушева [10], выведенная на основании диффузионной теории взвешивания наносов при использовании полуэмпирической формулы мутности взмыва $S_{взм}$. Средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности $S_{тр}$, выражается таким образом:

$$S_{тр} = \Gamma S_{взм}, \quad (7,4)$$

где Γ — гидромеханический параметр наносов. Параметр Γ определяет распределение мутности в потоке и находится по одной из приводимых ниже формул, в зависимости от того, каким образом задан состав наносов.

Мутность взмыва вычисляется по формуле

$$S_{взм} = a 150 N \eta^2 \frac{v_{ср}^2}{H}, \quad (7,5)$$

где H — средняя глубина потока, η — отношение донной скорости к поверхностной, N — характеристическое безразмерное число, a — эмпирический поправочный множитель, о котором говорилось выше;

$$\eta^2 = \frac{0,53 C - 4,1}{C - 2}, \quad (7,6)$$

$$N = \frac{MC}{g}; \quad (7,7)$$

здесь g — ускорение силы тяжести; величина M при $10 \leq C \leq 60$ находится по формуле

$$\left. \begin{aligned} M &= 0,7C + 6, \\ M &= 48 = const. \end{aligned} \right\} \quad (7,8)$$

а при $C > 60$

Для упрощения расчета построена номограмма зависимости (7,5), в которой $S_{взм}$ представлена как функция трех переменных: C , H и $v_{ср}$ (рис. 10) и принято $a = 1$. Если a отличается от единицы, то снимаемые с графика значения мутности взмыва умножаются на a .

При расчете заиления водохранилищ важным условием успеха работы является наличие надежных сведений о гранулометрическом составе транспортируемых потоком наносов и донных отложений. В соответствии с этим рекомендуется вычислять параметр Γ по форму-

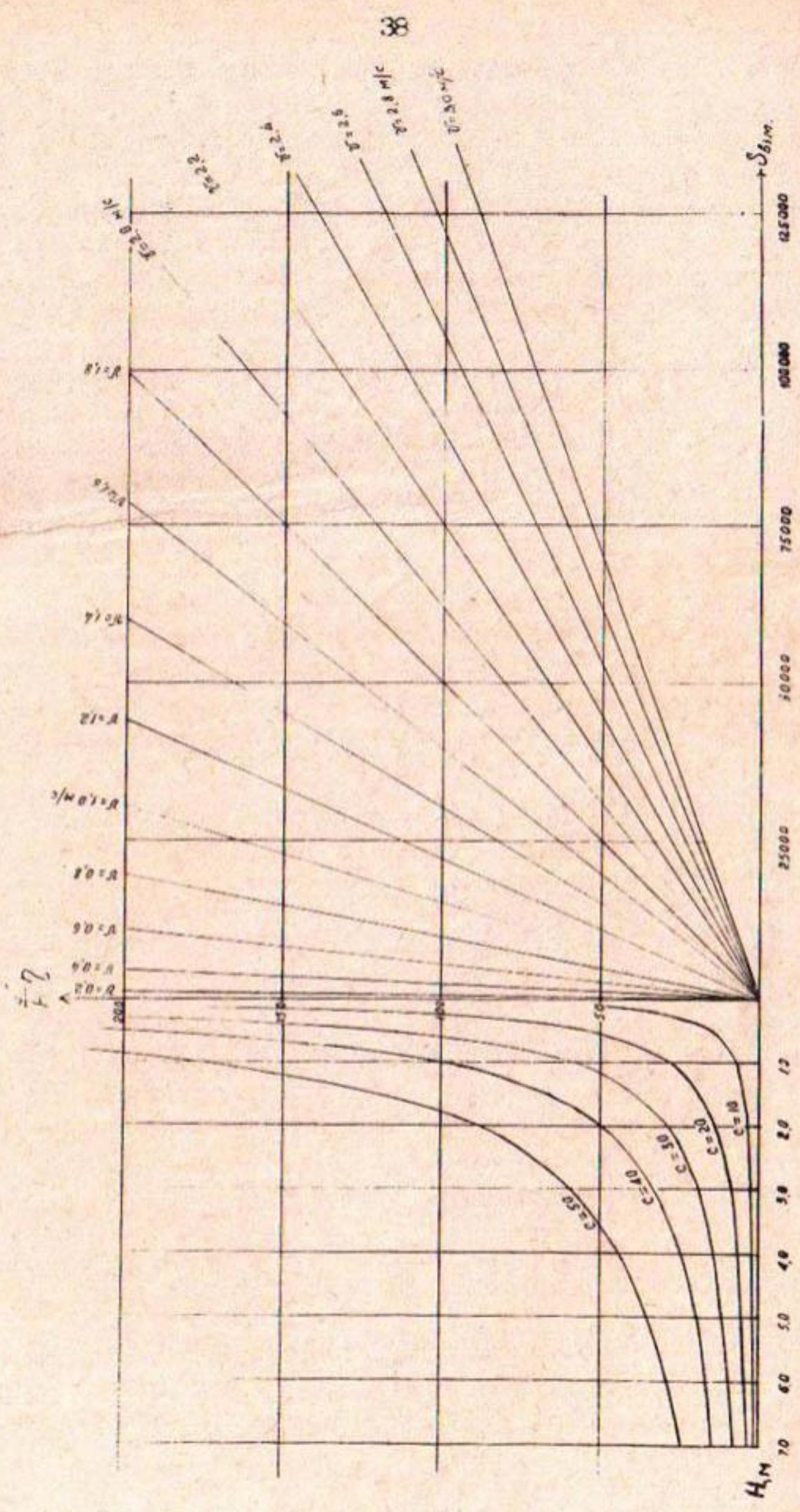


Рис. 10. Графики для определения мутности обмена S_{vz} по формуле Карауша.

лам, детально учитывающим гранулометрический состав наносов. Только в крайнем случае, для грубо-приближенных расчетов, можно пользоваться средним значением гидравлической крупности u транспортируемых наносов.

6. Если используется только средняя гидравлическая крупность u транспортируемых наносов, то Γ находится непосредственно по графикам (рис. 11) в зависимости от коэффициента Шези C и безразмерной величины G , определяемой равенством

$$G = \frac{u}{v_{cp}}, \quad (7,9)$$

в котором v_{cp} — средняя скорость потока в м/сек. и u в м/сек. Более точно значение Γ вычисляется как произведение функций $\Phi(\epsilon)$ и $\mathcal{B}(C, G)$, т.е.

$$\Gamma = \Phi \cdot \mathcal{B}. \quad (7,10)$$

Значения Φ и $\mathcal{B}$ находятся по табл. 7 и 8 или по графикам, приведенным в книге А.В. Караушева [10], в зависимости от аргументов ϵ , G и C . Величины G и C известны, пояснения требует только ϵ . Эта безразмерная величина определяется соотношением

$$\epsilon = \frac{u}{W}, \quad (7,11)$$

где W — среднее значение абсолютной величины пульсационной скорости, вычисляемое следующим образом:

$$W = \frac{v_{cp}}{\sqrt{N}}; \quad (7,12)$$

N находится по формуле (7,7).

7. При рассмотрении транспорта наносов по фракциям гидромеханический параметр наносов Γ вычисляется по формулам, содержащим суммы, слагаемые которых включают частные значения Γ_i , определяемые для отдельных фракций. Для i -той фракции

$$\Gamma_i = \Phi_i \mathcal{B}_i. \quad (7,13)$$

Частные значения Φ_i находятся по табл. 7 в зависимости от аргумента

$$\epsilon_i = \frac{u_i}{W}, \quad (7,14)$$

где u_i — гидравлическая крупность наносов i -той фракции.

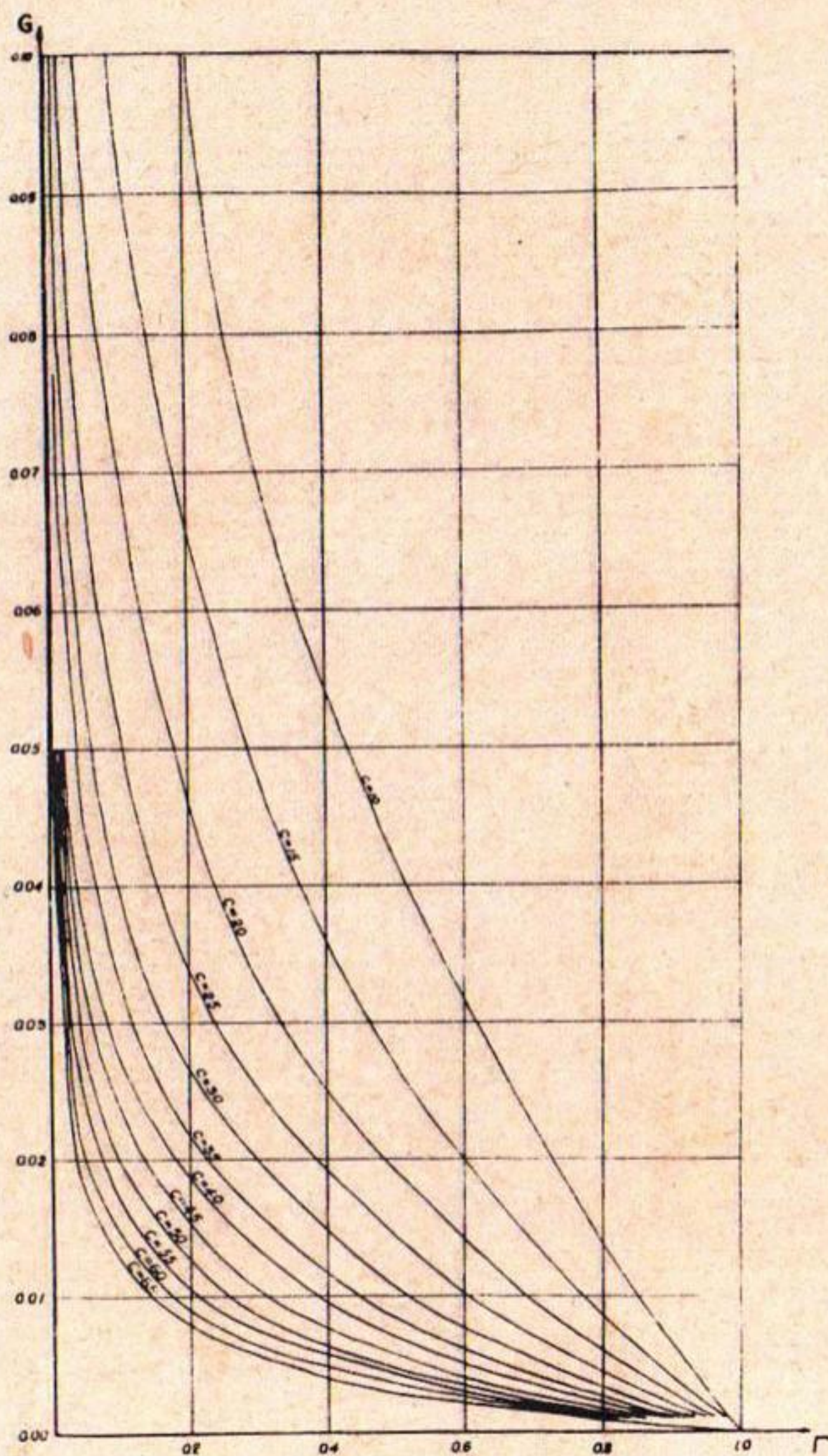


Рис. 11. Графіки функції $\Gamma(G, C)$.

Таблица функции $\varphi(\varepsilon)$

ε	φ	ε	φ	ε	φ
0,0001	1,000	0,15	0,730	1,12	0,108
0,0005	1,000	0,20	0,658	1,40	0,062
0,002	0,996	0,27	0,580	1,65	0,035
0,02	0,960	0,34	0,510	1,95	0,017
0,05	0,902	0,40	0,456	2,40	0,006
0,08	0,848	0,65	0,274	2,90	0,0008
0,10	0,812	1,00	0,144	3,00	0,0000

Частные значения B_i находятся по табл. 8 в зависимости от коэффициента Шези C и частного значения G_i

$$G_i = \frac{u_i}{V_{cp}} \quad (7,15)$$

Величина Γ_i при приближенном расчете может быть снята непосредственно с графика (рис. II), в предположении, что G заменено G_i .

Ниже рассматриваются конкретные случаи вычисления гидромеханического параметра наносов Γ в зависимости от способа задания состава наносов.

8. При наличии сведений о механическом (гранулометрическом) составе транспортируемых потоком наносов гидромеханический параметр Γ в формуле Караушева вычисляется по соотношению

$$\Gamma = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i}} \quad (7,16)$$

где $\alpha_{ср i}$ — процентное содержание i -той фракции в составе транспортируемых потоком (в частности, взвешенных) наносов, m — число всех транспортируемых фракций, Γ_i — частное значение параметра, вычисляемого для i -той фракции. Суммирование производится по всем транспортируемым потоком фракциям наносов.

9. Если задан состав донных отложений, то параметр Γ определяется несколько более сложным путем. В первую очередь необходимо выделить взвешиваемые фракции из состава донных отложений.

Таблица 8

Таблица функций J_5 (с. 4)

$\frac{C}{\varphi}$	1000°	900°	800°	700°	600°	500°	400°	300°	200°	100°	0°	100°	200°	300°	400°	500°	600°	700°	800°	900°	1000°
10	0,998	0,995	0,989	0,983	0,982	0,967	0,955	0,942	0,925	0,912	0,849	0,762	0,637	0,519	0,425	0,328	0,228	0,155			
15	0,998	0,992	0,984	0,975	0,969	0,943	0,922	0,903	0,876	0,854	0,758	0,635	0,481	0,350	0,262	0,161	0,080				
22	0,998	0,988	0,973	0,959	0,952	0,918	0,884	0,852	0,813	0,784	0,652	0,502	0,348	0,222	0,157	0,092	0,050				
25	0,997	0,982	0,966	0,941	0,931	0,884	0,839	0,797	0,745	0,708	0,547	0,387	0,236	0,146	0,101	0,059	0,030				
30	0,995	0,976	0,952	0,920	0,907	0,845	0,787	0,735	0,671	0,628	0,450	0,292	0,165	0,099	0,069	0,042	0,020				
35	0,993	0,968	0,938	0,905	0,881	0,803	0,729	0,672	0,599	0,550	0,360	0,227	0,119	0,071	0,050	0,031	0,017				
40	0,992	0,960	0,922	0,872	0,852	0,759	0,678	0,608	0,528	0,477	0,294	0,168	0,089	0,054	0,039	0,024	0,014				
45	0,990	0,951	0,905	0,845	0,821	0,712	0,622	0,545	0,461	0,410	0,237	0,130	0,069	0,043	0,031	0,020	0,012				
50	0,988	0,941	0,886	0,815	0,788	0,665	0,565	0,486	0,400	0,350	0,191	0,102	0,055	0,034	0,025	0,016	0,010				
55	0,985	0,930	0,866	0,786	0,754	0,618	0,512	0,430	0,346	0,296	0,160	0,083	0,045	0,029	0,021	0,013	0,008				
60	0,983	0,920	0,845	0,761	0,719	0,572	0,562	0,380	0,298	0,253	0,141	0,069	0,038	0,024	0,018	0,011	0,006				
65	0,980	0,905	0,823	0,730	0,684	0,527	0,414	0,334	0,257	0,216	0,128	0,058	0,032	0,021	0,015	0,010	0,005				

Транспортируемые потоком наносы обычно делят на взвешенные и влекомые. Наносы, переносимые в толще потока, называют взвешенными. Под влекомыми наносами понимают обычно наносы, перемещаемые в придонном слое потока, независимо от того, как они перемещаются: перекачиваются по дну или переносятся во взвешенном состоянии. Наносы придонного слоя при движении описывают сложные траектории, иногда падая на дно и затем снова отрываясь от него и переносясь на некоторое расстояние по течению, или же, захваченные мощными турбулентными восходящими течениями, увлекаются вглубь потока и затем снова опускаются вниз. Будем считать влекомыми наносами только те, которые перекачиваются по дну потока, но не могут быть взвешены. Все остальные наносы, переносимые во взвешенном состоянии, будем относить к категории взвешенных наносов, независимо от того, большие ли пути совершают они одновременно при движении вниз по течению (относительно мелкие частицы) или же их путь постоянно прерывается остановками (относительно крупные частицы). В ряде случаев на дне потоков находятся весьма крупные частицы, которые не могут быть не только взвешены, но и сдвинуты с места при данной скорости течения; они представляют группу неподвижных наносов и в смеси с более мелкими категориями образуют верхний активный слой русла. При расчете транспорта наносов необходимо выяснить, какую долю поверхностного слоя наносов составляют подвижные фракции. Это условие подвижности изменяется с изменением режима течения потока.

Предельная гидравлическая крупность частицы, которая определяет верхнюю границу крупности взвешиваемых частиц ($W_{пред}$), находится на основании равенства

$$W_{пред} = W_{max}, \quad (7,17)$$

где W_{max} — наибольшее значение вертикальной составляющей пульсационной скорости; эта величина вычисляется по формуле

$$W_{max} = \frac{3V_{ср}}{\sqrt{N}} = \frac{3\sqrt{g} V_{ср}}{1 \text{ мс}}, \quad (7,18)$$

где все обозначения прежние.

Сумма процентов всех фракций наносов в составе активного слоя русла равна 100. Получив по формуле (7,17) границу взвешиваемых фракций, легко находим общий процент взвешиваемых наносов; пусть этот процент равен γ . Необходимо сделать пересчет процентного содержания каждой фракции. Если в составе верхнего слоя

донных отложений некоторая i -тая фракция (которая взвешивается при данных условиях) составляет $\alpha_{днi}$ %, то в составе взвешиваемых фракций донных отложений i -тая фракция будет содержаться в относительно большем проценте. В том же проценте эта фракция будет содержаться во взвешенных наносах граничного слоя потока, образующих мутность взмыва; этот процент обозначим через $\alpha_{взмi}$. Итак, для расчета должно быть использовано следующее соотношение:

$$\alpha_{взмi} = \frac{100}{\tau} \alpha_{днi} \quad (7,19)$$

Очевидно, что
$$\sum_{i=1}^m \alpha_{взмi} = 100, \quad (7,20)$$

где m — число всех взвешиваемых фракций. Выражение (7,20) используется для проверки. Если граница, определяющая предел взвешивания, делит какую-либо фракцию на 2 части: взвешиваемую и невзвешиваемую, то в соответствии с этим фракция делится на две, одна из которых со свойственным ей средним размером включается в состав взвешиваемых наносов.

10. Гидромеханический параметр наносов при заданном составе донных отложений вычисляется по следующей формуле:

$$\Gamma = \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{взмi}}{100} \Gamma_i \quad (7,21)$$

Содержащая здесь величина $\alpha_{взмi}$ находится из соотношения (7,19), а Γ_i , как и выше, по графикам (рис. II) или вычисляется как произведение функций Φ_i и $\mathcal{B}_i$.

11. Выражение мутности, отвечающей транспортирующей способности потока, может быть записано и для отдельной фракции переносимых потоком наносов. Эту величину назовем мутностью частной транспортирующей способности и обозначим через $\mathcal{J}_{iтр}$. При заданном составе донных отложений

$$\mathcal{J}_{iтр} = \frac{\alpha_{взмi}}{100} \Gamma_i \mathcal{S}_{взм}; \quad (7,22)$$

$\mathcal{S}_{взм}$, как и выше, — общая мутность взмыва.

При заданном составе транспортируемых наносов

$$\mathcal{J}_{iтр} = \frac{\alpha_{фi}}{100} \mathcal{S}_{тр} \quad (7,23)$$

12. При вычислении $\mathcal{J}_{iтр}$ для начального створа водохранилища может быть использована любая из приведенных выше формул (7,22) или (7,23). При вычислении $\mathcal{J}_{iтр}$ для водохранилища следует пользоваться только формулой (7,22), т.к. состав взвешенных

наносов для водохранилища не может быть заранее задан (начальный состав наносов по длине водохранилища изменяется).

При вычислении частных значений мутности, отвечающих транспортирующей способности $J_{i\text{тр}}$ для водохранилища, используются данные по гранулометрическому составу донных отложений. На основании этих данных находятся величины $\alpha_{взм i}$, фигурирующие в формуле (7,22). При отсутствии данных о составе донных отложений в водохранилище при расчете для первого года эксплуатации состав отложений принимается соответствующим составу донных отложений на начальном (входном) створе водохранилища.

13. Может иметь место случай, когда данные о составе отложений на начальном створе отсутствуют, а имеются лишь сведения о составе взвешенных наносов. В этом случае следует определить состав донных отложений начального створа расчетным путем. Исходными при этом являются данные о составе взвешенных наносов и гидравлических элементах потока. Так как для руслового режима реки определяющим является паводок, расчет ведется при использовании средних гидравлических элементов потока в период паводка. Строго говоря, получить состав донных отложений по составу взвешенных наносов нельзя, т.к. отложения могут содержать и невзвешиваемые фракции. Расчет дает значение $\alpha_{взм i}$, т.е. процентное содержание лишь взвешиваемых фракций, составляющих мутность взмыва. Однако для расчета транспорта наносов и осаждения этого оказывается вполне достаточно.

Вычисления ведутся по формуле

$$\alpha_{взм i} = \frac{\alpha_{ср i}}{\Gamma_i \sum_{i=1}^m \frac{\alpha_{ср i}}{100 \Gamma_i}}, \quad (7,24)$$

где $\alpha_{ср i}$ — процент рассматриваемой фракции в составе взвешенных наносов. Сумма берется по всем m фракциям взвешенных наносов. Вычисление по формуле (7,24) выполняется для каждой фракции взвешенных наносов.

Полученный по расчету состав донных отложений распространяется на все водохранилище за первый год эксплуатации.

Для последующих лет состав отложений в водохранилище находится непосредственно по данным расчета заиления. Так, при расчете заиления для второго года эксплуатации состав отложений находится по результатам расчета заиления на конец первого года, для третьего года — по результатам расчета на конец второго года и т.д.

14. При расчете заиления водохранилищ на реках Средней Азии часто используется формула А.Н. Гостунского / 6 / для транспортирующей способности потока. Эта формула может быть рекомендована для указанных условий. Однако необходимо ввести в нее поправочный множитель a , вычисляемый по формулам (7,1-7,3).

Формула А.Н. Гостунского может быть приведена к виду

$$S_{тр} = a \cdot 3,3 \cdot 10^6 - \frac{V_{ср}^3}{C^3 N_{ср} U_{ср}} ; \quad (7,25)$$

$S_{тр}$ в г/м³. Все обозначения соответствуют принятым выше; $U_{ср}$ — средняя гидравлическая крупность транспортируемых наносов. При отсутствии данных натурных измерений расходов наносов поправочный множитель a принимается равным единице. Следует иметь в виду, что при проверке формулы А.Н. Гостунского на материалах, относящихся к большим и средним рекам средней полосы СССР, обнаружилось, что в указанных условиях эта формула дает очень большое преувеличение мутности.

15. Расход наносов R получается умножением вычисленных по теоретическим формулам значений мутности на расход воды, т.е.

$$R = 10^{-3} S Q \quad \text{кг/сек} \quad (7,26)$$

или

$$R = 10^{-6} S Q \quad \text{т/сек}, \quad (7,27)$$

где множители 10^{-3} и 10^{-6} служат для перевода расхода наносов из граммов соответственно в килограммы или тонны в секунду.

16. При наличии достаточных натурных данных по мутности и гранулометрическому составу взвешенных наносов и донных отложений реки, на которой проектируется водохранилище, может быть использован эмпирический способ оценки транспортирующей способности водохранилища. Для этой цели применяется метод, разработанный К.И. Россинским и И.А. Кузьминым [20].

Согласно рекомендациям К.И. Россинского и И.А. Кузьмина, транспортируемые потоком наносы должны быть разделены на мелкие и руслоформирующие. Последние представлены в донных отложениях реки в достаточном количестве, мелкие же фракции в этих отложениях встречаются в весьма малом количестве. По этому признаку путем сопоставления гранулометрического состава взвешенных нано-

Получив процентное содержание руслоформирующих фракций в составе транспортируемых наносов при каждом измерении расхода, находит расходы руслоформирующих наносов и отвечающие им значения средней мутности потока. Далее вычисляется некоторый гидравлический параметр, от которого предполагается зависящей мутность потока. По принятому К. И. Россинским предположению таким параметром является величина $\frac{V_{cp}}{H^{0,33}}$. Строится график зависимости $J_{p.ф}$ (мутность руслоформирующих фракций) от $\frac{V_{cp}}{H^{0,33}}$. Обычно обнаруживается значительный разброс точек, поэтому на поле чертежа изображаются две линии—верхняя и нижняя огибающие. Принимается, что верхняя огибающая отвечает предельному насыщению потока наносами; она и применяется при расчете заиления водохранилищ.

При использовании рассматриваемого здесь метода водохранилище по длине делится на расчетные участки. Длина участка берется порядка удвоенной его ширины. Если на участок поступает поток с мутностью, выходящей за пределы верхней огибающей связи $J_{p.ф} = f\left(\frac{V_{cp}}{H^{0,33}}\right)$, то происходит заиление участка. Условно принимается, что к концу участка насыщение отвечает предельному состоянию потока, т.е. верхней огибающей, поэтому мутность для конца участка принимается по верхней огибающей. Разность мутности в начале и конце участка, умноженная на расход воды, дает секундное осаждение наносов на участке.

Для мелких фракций выполняются аналогичные построения. Размеры заиления крупными и мелкими фракциями суммируются.

УШ. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСХОДОВ ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ

1. Если наносы, образующие поверхностный слой русла (активный слой), характеризуются содержанием значительного количества мелких фракций и непрерывной кривой фракционного состава, то рассмотренный в предыдущем разделе способ выделения взвешенных фракций по признаку $U_{пред} = W_{max}$ (8,1)

позволяет выделить практически все транспортируемые потоком наносы донного аллювия. Рассмотренные в том же разделе формулы транспортирующей способности, предложенные А. В. Караушевым, предусматривают возможность оценки транспорта всех наносов, в том числе и крупных, приближающихся к пределу (8,1). Если же донный аллювий состоит преимущественно из крупного материала, который транспортируется потоком в основном лишь в придонном слое (влекомые наносы), то указанные формулы не применяются. В этом случае используются формулы, предназначенные специально для определения расходов влекомых наносов.

2. Расчет расходов влекомых наносов и подсчет их стока выполняются также и в тех случаях расчета заиления, когда реки транспортируют большое количество влекомых наносов (главным образом горные реки), а натурные данные имеются только по стоку взвешенных наносов. В этом случае расчет заиления водохранилищ разделяется на определение собственно заиления за счет взвешенных наносов и заиления за счет влекомых наносов (иногда говорят: занесение влекомыми наносами).

3. Оценка подвижности донных наносов определенной крупности при заданных гидравлических условиях выполняется по формулам Г.И. Шамова [24] или В.Н. Гончарова [5]. Формула Г.И. Шамова для начальной скорости движения частицы $V_{нач}$ (м/сек.) имеет вид

$$V_{нач} = 4,4 d^{1/3} H^{1/6}, \quad (8,2)$$

где d — диаметр частицы (или средний диаметр фракции донных отложений), выраженный в м, H — средняя глубина потока в м. На рис. 12 изображены расчетные графики уравнения (8,2).

Массовое движение частиц данного размера происходит при скорости $V_{нач\ верх}$.

$$V_{нач\ верх} = 6,0 d^{1/3} H^{1/6}. \quad (8,3)$$

$V_{нач}$ показывает ту минимальную скорость, при которой приходят в движение отдельные частицы рассматриваемой фракции, находящиеся на поверхности русла. Частицы же, находящиеся в движении, прекращают свое движение при скорости потока, равной $V_{отл}$, причем

$$V_{отл} = 0,84 V_{нач} = 3,7 d^{1/3} H^{1/6}. \quad (8,4)$$

Формула В.Н. Гончарова для начальной скорости имеет вид

$$V_{нач} = \left(\lg \frac{8,8H}{d_{max}} \right) \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)}{3,5\gamma}} d_{cp}; \quad (8,5)$$

здесь d_{cp} и d_{max} — соответственно средний и максимальный диаметры частиц донных наносов в м, H — глубина потока в м, γ — удельный вес воды ($\gamma = 1,0 \text{ т/м}^3$), γ_s — удельный вес частиц наносов; для обычных речных наносов с достаточным приближением можно принять $\gamma_s = 2,7 \text{ т/м}^3$; получаемая по формуле скорость выражается в м/сек.

4. Для вычисления расхода влекомых наносов используются формулы Г.И. Шамова, Доу Го-жэня и И.В. Егiazарова. Первая из них

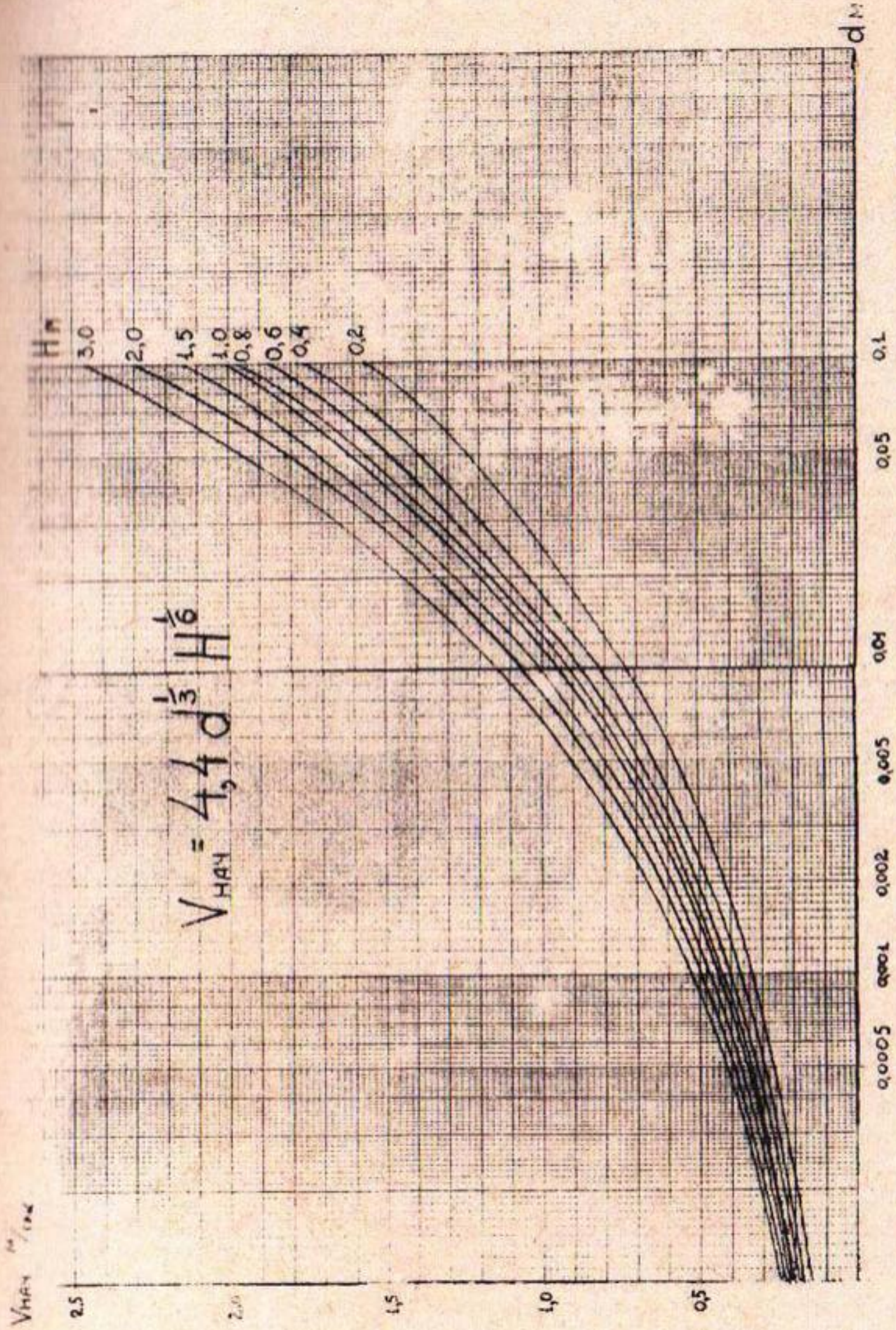


Рис. 12. Графики для определения начальной скорости влечения $U_{\text{нач}}$ по формуле Шамова.

рекомендуется для песчаных донных наносов, формулы Доу Го-жэня и Егiazарова могут применяться как для крупных, так и для мелких частиц наносов. Классификацию частиц принимаем по таблице ГГИ (табл. 9). Для граничных областей полезно взаимно контролировать расчеты по указанным формулам.

Таблица 9

Классификация наносов (средний диаметр в мм)

Подраз- деле- ние	Валуны	Галька	Гравий	Песок	Пыль	Ил	Глина
Крупные	500-1000	50-100	5-10	0,5-1,0	0,05-0,10	0,005-0,010	Мелкие 0,001
Средние	200-500	20-50	2-5	0,2-0,5	-	-	
Мелкие	100-200	10-20	1-2	0,1-0,2	0,01-0,05	0,001-0,005	

Формула Г.И. Шамова имеет вид

$$R_{дн} = 0,95 B \sqrt{d_{ср}} \left(\frac{V_{ср}}{V_{отл}} \right)^3 (V_{ср} - V_{отл}) \left(\frac{d_{ср}}{H} \right)^{1/4}, \quad (8,6)$$

где H , B и $d_{ср}$ берутся в м, а скорость в м/сек. Вычисленный расход наносов придонного слоя $R_{дн}$ выражается в кг/сек. Шамов указывает следующий предел применимости своей формулы: d не должно быть менее 0,1-0,2 мм.

Величина $d_{ср}$ находится как средневзвешенное значение крупности наносов по формуле

$$d_{ср} = 0,01 \sum_{i=1}^m \alpha_i d_i, \quad (8,7)$$

где α_i и d_i - соответственно процентное содержание и средний размер некоторой (i -той) фракции наносов, m - число фракций.

Формула Доу Го-жэня имеет вид

$$R_{дн} = 0,048 \delta_s d_{ср} (V_{ср} - V_k) \frac{W}{V_k} \cdot \frac{V_{ср}^2}{V_k^2}, \quad (8,8)$$

где $R_{дн}$ - расход донных наносов, т/сек.; δ_s - удельный вес наносов; $d_{ср}$ - средний диаметр донных отложений, м; $V_{ср}$ - средняя скорость потока, м/сек.; V_k - средняя скорость потока, отвечающая (первому) критическому состоянию трогания частиц наносов, м/сек; W - среднее из абсолютных значений пульсационной скорости, м/сек.

Средняя скорость потока, отвечающая началу движения наносов, определяется Доу Го-хенем следующей формулой:

$$U_K = \sqrt{g} \left(1 + \frac{1}{3\psi}\right) \sqrt{\frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma} d \left(2,4 + 16 \frac{H}{H_a}\right) + \left(37 + 274 \frac{H}{H_a}\right) \frac{H_a \sigma}{d}} \quad (8,9)$$

здесь $\psi = 0,25 \left(\frac{H}{d_0}\right)^{1/8}$, H_a - атмосферное давление, выраженное высотой водяного столба, σ - толщина слоя молекул воды, равная 3×10^{-10} м, $g = 9,8$ м/сек. - ускорение силы тяжести; остальные обозначения прежние; все величины выражены в метрах. Для определения W Доу Го-хень рекомендует формулу

$$W = 0,8 \left(1 + \frac{1}{3\psi}\right) \sqrt{g H J} ; \quad (8,10)$$

здесь все обозначения прежние.

Формула И.В. Егiazарова имеет вид

$$G = 0,015 \sigma Q \sqrt{J} \left[\frac{R' J}{\rho' \phi_0 d_{50}} - 1 \right] ; \quad (8,11)$$

здесь G - расход донных и взвешенных руслоформирующих наносов, выраженный весом наносов в воде, т/сек; Q - расход воды, м³/сек., J - уклон водной поверхности; $R' = R - R''$ - доля гидравлического радиуса, определяющая транспорт наносов (R - полный гидравлический радиус; R'' - доля гидравлического радиуса, учитывающая добавочное сопротивление, обусловленное грядовым движением наносов и сопротивлением берегов); ϕ_0 - коэффициент сопротивления подвижного русла; d_{50} - медианный диаметр частиц, определяемый по гранулометрической кривой наносов, находящихся в движении при заданном расходе воды Q ; $\rho' = \frac{\sigma_s - \sigma}{\sigma}$; σ_s и σ - удельный вес наносов и воды, т/м³. Понятию взвешенных руслоформирующих наносов придается тот же смысл, что и в п.16 раздела УП.

Коэффициент сопротивления ϕ_0 определяется Егiazаровым из условий трогания частиц по выражению

$$\phi_0 = \frac{R' J}{\rho' d_{max}} , \quad (8,12)$$

в котором d_{max} - максимальный размер частицы, перемещаемой при данном режиме потока (или частицы, находящейся в предельном равновесии). Величина d_{max} может быть определена по гранулометрической кривой наносов, находящихся в движении при заданном расходе воды, или по приведенной выше формуле Шамова для начальной скорости влечения.

Для широких безгрядовых русел (т.е. в случае отсутствия сопротивления, обусловленного влиянием берегов и грядовых образований) вместо доли гидравлического радиуса R' в формулу (8,II) вводится средняя глубина потока H_{cp} . Медианный диаметр d_{50} для неширокой смеси наносов может быть заменен средним диаметром частиц ($d_{50} \cong d_{cp}$) из состава передвигаемых фракций.

Подстановка в формулу (8,II) вместо величин ϕ_0 , R' и d_{50} принятых выше значений, введение множителя $\frac{\sigma_s}{\sigma_s - \gamma} = 1,6$ для перехода от веса в воде к весу в воздухе, а также замена уклона J его значением по формуле Шези позволяют записать формулу Егiazарова следующим образом:

$$R_{gn} = 24Q \frac{V_{cp}}{C\sqrt{H}} \left(\frac{d_{max}}{d_{cp}} - 1 \right), \quad (8,13)$$

где R_{gn} — расход донных и взвешенных руслоформирующих наносов в кг/сек. (вес в воздухе).

Формула применима как при наличии самоотмостки русла, так и при ее нарушении.

Этой формулой и рекомендуется пользоваться для определения расхода влекомых наносов.

5. При наличии фактических данных о расходах влекомых наносов необходимо вводить в формулы поправочные коэффициенты α , подобно тому, как это делается при вычислении расхода взвешенных наносов по формуле транспортирующей способности (см. предыдущий раздел).

6. Сток влекомых наносов оценивается путем умножения R_{gn} на интервал времени, в течение которого имеет место тот режим потока, для которого получено значение R_{gn} . Такие вычисления выполняются для нескольких расчетных интервалов времени, на которые разбивается год, исходя из формы гидрографа. В зависимости от емкости водохранилища расчет ведется по типовому для многолетнего периода гидрографу, обеспечивающему получение среднемноголетнего значения стока влекомых наносов, или же по нескольким типовым гидрографам, характеризующим очень высокий, средний и низкий годовой сток реки. Выбор гидрографа и величины годового стока воды при расчете заиления по одному типовому гидрографу производится на основании предварительных вспомогательных расчетов для многолетнего периода, выполняемых по отдельным значениям расходов воды с учетом их продолжительности за все многолетие. Получаемые частные значения стока наносов суммируются, а сумма делится на число лет. Затем производятся такие же подсчеты для отдельных лет и выбирается тот год, который дает близкое к среднемноголетней величине значение годового стока влекомых наносов.

Классификация донных отложений по гранулометрическому составу

Название грунта	Диаметр частиц (мм) и их содержание (в % по весу)													
	галька			гравий			песок			пыль		ил		глина
	100-50	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
Илы тонкие														
Илы														
Илы с примесью песка														
Мелкие пески замленные														
Мелкие и средние пески замленные														
Средние пески замленные														
Мелкие пески														
Средние пески														
Средние и крупные пески														
Пески с гравием														
Гравий														
Галька с гравием														

Обозначения:



10-20%



20-40%



40-70%

Значения объемного веса донных отложений
зайляемых водохранилищ и прудов

Название грунта	$\gamma_{отл}$
Илы тонкие	0,7-0,8
Илы	0,8-0,9
Илы с примесью песка	0,9-1,1
Мелкие пески зайленные	1,1-1,2
Мелкие и средние пески зайленные	1,2-1,3
Средние пески зайленные	1,3-1,5
Мелкие пески	1,5-1,6
Средние пески	1,6-1,7
Средние и крупные пески	1,6-1,8
Пески с гравием	1,7-1,9
Гравий	1,8-2,1
Галька с гравием	2,0-2,4

IX. ОЦЕНКА ОБЪЕМНОГО ВЕСА ОТЛОЖЕНИЙ В ЗАИЛЯЕМЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

1. Расчет заиления водоема позволяет получить не только количественную, но и качественную характеристику отложений, т.е. их гранулометрический состав. По гранулометрическому составу донных отложений устанавливается тип грунта, согласно классификации, приведенной в табл. 10 (составлена Г.А. Петуховой).

2. Для оценки объемного веса $\gamma_{отл}$ донных отложений приводится табл. 11 (составлена Г.А. Петуховой), в которой даны значения $\gamma_{отл}$ в т/м³ для различных типов грунтов, по классификации, принятой в табл. 10. Степень уплотнения грунтов в этой таблице не учитывается; предполагается, что достигнуто достаточное уплотнение, отвечающее нескольким годам эксплуатации водоема.

3. В табл. 11 не учитывается содержание органических веществ. Известно, что с увеличением содержания органических примесей объемный вес донных отложений уменьшается. Например, по данным Н.И. Дрозда [7], объемный вес отложений прудов южной части Украины при 5%-ном содержании органических остатков уменьшается на 20-30%, при 10%-ном - на 30-40%. Это соотношение следует принимать во внимание при оценке объемных весов грунтов, содержащих очень большое количество органических остатков.

4. Получаемые значения объемных весов грунтов используются для перехода от весового выражения заиления P_a т к объемному W_a м³; очевидно, что

$$W_a = \frac{1}{\gamma_{отл}} P_a \quad (9,1)$$

Если вес отложений дан в кг, а $\gamma_{отл}$ принимается по табл. 11, то переход к объемному выражению (в м³) осуществляется по формуле

$$W_a = \frac{10^{-3}}{\gamma_{отл}} P_a, \quad (9,2)$$

в которой множитель 10^{-3} учитывает переход от килограммов к тоннам.

X. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ С РАЗЛИЧНОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЕМКОСТЬЮ

1. В целях конкретизации методики расчета заиления водохранилищ представляется целесообразным разделить все водохранилища на 3 категории. В качестве характеристики для классификации водохранилищ удобно принять относительную емкость водохранилища. Относительной емкостью водохранилища будем называть частное от деления его объе-

ма W при НПГ на объем годового притока воды в водохранилище V_n . Последняя величина определяется по норме стока воды реки, питающей водохранилище. Относительную емкость обозначим через $\tilde{W}$. Таким образом,

$$\tilde{W} = \frac{W}{V_n} \quad (10,1)$$

Величина $\tilde{W}$ является очень важной для оценки заиляемости водохранилища. Теоретическое рассмотрение процесса заиления указывает на наличие функциональной зависимости между аккумулирующей способностью водохранилища в отношении наносов и его относительной емкостью. Водохранилища с относительной емкостью, превышающей 0,6, будем называть водоемами с высокой относительной емкостью. Водохранилища, характеризующиеся величиной $\tilde{W}$, заключенной в пределах $0,15 < \tilde{W} < 0,6$, назовем водоемами средней относительной емкости. При $\tilde{W} < 0,15$ будем иметь водоемы малой относительной емкости.

2. В водохранилищах большой относительной емкости ($\tilde{W} > 0,6$) происходит осаждение практически всех наносов, принесенных вместе со стоком воды. Расчет общего заиления таких водохранилищ крайне прост; он выполняется на основании нормы стока наносов. Ввиду большой емкости заиление таких водохранилищ происходит в течение длительного периода, поэтому нет необходимости учитывать многолетнюю изменчивость стока наносов. Общая величина годового заиления оказывается равной годовому стоку наносов. Если заиление мало влияет на объем водохранилища, т.е. не приводит к его заметному уменьшению, то объем заиления для первых лет эксплуатации находится простым суммированием стока наносов за каждый год. Если общий объем заиления к концу определенного расчетного года оказался уже значительным (более 10% от первоначального объема водохранилища), то расчет для последующих лет надо делать с учетом затухания процесса при использовании рассматриваемых ниже методов Г.И. Шамова или В.С. Лаппенкова. При относительно большом заилении за первый год указанные методы применяются с самого начала расчета.

Если необходимо получить распределение отложений по длине водохранилища, то расчет ведется на основании общей методики расчета, излагаемой ниже.

3. В водохранилищах средней относительной емкости ($0,15 < \tilde{W} < 0,6$) в зависимости от особенностей водохранилища, его режима и местных особенностей может иметь место вынос за преде-

ли водоема значительной доли поступающих наносов (до 30% от общего стока) или же наносы будут осаждаться практически полностью в водоеме. Расчет заиления должен в этом случае начаться с предварительного выяснения возможного наибольшего выноса наносов за пределы водохранилища. Выделяется период паводка (наиболее многоводного года — если расчет ведется с учетом многолетней изменчивости стока воды и наносов, или период паводка среднего года, если такая изменчивость не учитывается) и устанавливается путем расчета, какой процент от паводочного стока наносов выносится за пределы водохранилища вместе с тем объемом паводка, который сбрасывается в нижний бьеф. Если оказывается, что в рассматриваемом случае за пределы водохранилища (в нижний бьеф) сбрасывается менее 10% от паводочного стока наносов, то расчет заиления ведется в том же порядке, как и для водохранилищ с большой относительной емкостью. Если сбрасывается 10% или более, то расчет ведется в полном соответствии с даваемыми ниже указаниями, включающими учет выноса наносов за пределы водохранилища.

4. Расчет заиления водохранилищ малой относительной емкости ($\tilde{W} < 0,15$) выполняется в полном соответствии с приводимыми ниже рекомендациями.

5. Отличие прудов от водохранилищ состоит в их сравнительно небольших размерах. Обычно к прудам относят искусственные водоемы, площадь зеркала которых не превышает 2–4 км². Учитывая значительно меньшее народнохозяйственное значение прудов, для расчета их заиления рекомендуется (в разделе ХУІ) более простой способ, чем для расчета заиления водохранилищ.

ХІ. СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПОЛНОГО ЗАИЛЕНИЯ И ОБЪЕМОВ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ГОДАМ

І. Для оценки объема и хронологического хода заиления существуют весьма простые методы расчета, к числу которых относятся методы Г.И. Шамова [24], В.С. Лапшенкова [16] и С.Т. Алтунина [1]. Здесь рассматриваются только рекомендуемые методы Шамова и Лапшенкова (как наиболее простые и дающие достаточно удовлетворительные результаты). Указанные методы основаны на предположении, что интенсивность заиления затухает с течением времени по мере заполнения водохранилища наносами. Расчет ведется по осредненным за расчетный интервал времени величинам расхода воды и наносов во входном створе при некотором среднем положении кривой подпора при НПУ. За расчетный интервал принимается обычно год или период половодья. Оба метода основа-

ны на эмпирических соотношениях и при проверке дают численно близкие результаты.

2. В основу метода Г.И. Шамова [24] положено видоизмененное уравнение Орта, устанавливающее зависимость между объемом и продолжительностью заиления:

$$W_{at} = W_{a\text{прег}} (1 - a_o^t), \quad (\text{II}, 1)$$

где W_{at} - объем наносов в м^3 , отложившихся в водохранилище за период времени t ; t - число лет; $W_{a\text{прег}}$ - предельная величина объема отложений наносов в водохранилище (в м^3), по достижении которой дальнейшее заиление прекращается; $a_o = 1 - \frac{W_{a1}}{W_{a\text{прег}}}$ - параметр, характеризующий относительное заиление водохранилища в течение первого года; W_{a1} - объем отложений первого года, в м^3 . Величины W_{a1} и $W_{a\text{прег}}$ определяются приближенно по формулам Шоклича, уточненным Шамовым:

$$W_{a1} = \frac{1}{\gamma_{отл}} P \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_n} \right)^n \right], \quad (\text{II}, 2)$$

$$W_{a\text{прег}} = W \left[1 - \left(\frac{\omega_p}{\omega_n} \right)^m \right], \quad (\text{II}, 3)$$

где $P = RT$ - расчетный годовой сток наносов, в тоннах (R - средний годовой расход взвешенных наносов, т/сек; T - число секунд в году), $\gamma_{отл}$ - объемный вес отложений, в $\text{т}/\text{м}^3$; W - полный объем водохранилища, в м^3 ; ω_n - наибольшая площадь поперечного сечения верхнего бьефа на ближайшем к плотине участке, в м^2 ; ω_p - площадь поперечного сечения реки в бытовых условиях при расходе воды, равном $3/4$ от расчетного максимального расхода, в м^2 ; $m = 1,7$; n - показатель степени, зависящий от уклона реки; значения n помещены в табл. I2.

Таблица I2

Значения показателя степени n уравнения (II,2)
в зависимости от уклона

Уклон реки	0,0001	0,0001-0,001	0,001-0,01
n	1-0,8	0,8-0,5	0,5-0,33

3. В.С. Лапшенковым [15, 16] предложены расчетные зависимости для определения характеристик заиления при различных скоростных режимах в водохранилищах.

а) При скоростях течения в водохранилищах $V_{cp} > 0,15 \div 0,20$ м/сек. используется зависимость

$$W_{at} = W_{a\text{прег}} \left(1 - e^{-\frac{t}{E}} \right), \quad (II, 4)$$

где e – основание натуральных логарифмов, E – характеристика заиляемости подпертого бьефа; остальные обозначения прежние.

Предельно заиляемый объем ($W_{a\text{прег}}$) определяется разностью объемов подпертого бьефа при НПГ (W) и русла, которое сформируется на подпертом участке после окончательного заиления (W_p):

$$W_{a\text{прег}} = W - W_p. \quad (II, 5)$$

Объем W_p определяется произведением

$$W_p = L \cdot B \cdot H, \quad (II, 6)$$

где L – длина водохранилища до выклинивания кривой подпора в конце периода заиления, B – ширина русла, H – средняя глубина русла.

Величины B и H определяются по следующим формулам: в случае стеснения потока неразрываемыми берегами или сооружениями

$$H = \left(\frac{3300 Q^3 n^3}{S u B^3} \right)^{\frac{1}{4+3y}}; \quad (II, 7)$$

в случае свободного формирования русла

$$H = \left(\frac{3300 Q^3 n^3}{S u k^{3/m}} \right)^{\frac{1}{4+3y+3/m}}, \quad (II, 8)$$

$$B = (k H)^{1/m}; \quad (II, 9)$$

здесь n – коэффициент шероховатости, y – показатель степени при H – в формуле Н.Н. Павловского для вычисления коэффициента Шези; k и m – параметры С.Т. Алтунина, учитывающие форму русла и определяемые по данным русловых съемок (часто $m = 0,5$, $k = 3,0$).

Характеристика заиляемости E выражается отношением

$$E = \frac{W_{a\text{прег}} \delta_{отл}}{\varepsilon' P}, \quad (II, 10)$$

где E' — доля осаждающихся наносов в начале расчетного периода заиления, P — сток взвешенных наносов за расчетную единицу времени.

При наличии данных наблюдений в первый год работы гидроузла, если этот год не является маловодным, величина E' может быть определена по соотношению мутности воды, питающей водохранилище и сбрасываемой из него:

$$E = \frac{S_{\text{наз},0} - S_{\text{кон},0}}{S_{\text{наз},0}}; \quad (II,11)$$

здесь $S_{\text{наз},0}$ — расчетная бытовая мутность в начальном створе, $S_{\text{кон},0}$ — мутность в расчетном (конечном) створе в начальный момент времени $t = 0$. При отсутствии данных наблюдений автор рекомендует определять величину $S_{\text{кон},0}$ по формуле Гостунского:

$$S_{\text{ц}} = \frac{3300 \nu^3}{C^3 H}, \quad (II,12)$$

откуда величина мутности определяется по заранее построенной связи $S = f(S_{\text{ц}})$.

Для расчета мутности в конечном створе в момент времени t Лапшенков рекомендует выражение

$$S_{\text{кон},t} = S_{\text{кон},0} + W_{\text{ат}} \frac{\gamma_{\text{отл}} \cdot 10^6}{QE \Delta t}; \quad (II,13)$$

здесь Q — расчетный расход воды, м³/сек., Δt — расчетный интервал времени в секундах; множитель 10^6 служит для перевода тонн в граммы.

Это выражение приводится к следующему виду:

$$S_{\text{кон},t} = S_{\text{кон},0} + \frac{W_{\text{ат}}}{W_{\text{акрег}}} (S_{\text{наз},0} - S_{\text{кон},0}). \quad (II,14)$$

Приведенные формулы и входящие в них параметры могут быть отнесены либо к расчетному участку, либо ко всему водохранилищу в целом (от начала подпора до створа гидроузла).

б) При скоростях течения в водохранилище $V_{\text{ср}} < 0,15 \div 0,20$ м/сек. В.С. Лапшенков [16] рекомендует вести расчет заиления для отдельных расчетных участков с учетом фракционного состава взвешенных наносов по следующим расчетным зависимостям:

$$W_{\text{ат}} = W_{\text{акрег}} \left(1 - e^{-t \frac{\partial \epsilon_i}{E_{\text{л},i}}} \right); \quad (II,15)$$

$$S_{\text{кон},t} = S_{\text{наз},0} - 10^6 \gamma_{\text{отл}} \frac{W - W_{\text{ат}}}{Q} \cdot \frac{\partial \epsilon_i}{E_{\text{л},i}}. \quad (II,16)$$

В этих формулах $E_{л,i}$ - характеристика заиляемости расчетного участка водохранилища по i -той фракции наносов:

$$E_{л,i} = \frac{\omega_i \delta_{отл} \cdot 10^6}{\omega_i \theta_i S_{ноз,р,i} \Delta t}, \quad (II,17)$$

где ω_i - площадь живого сечения в расчетном створе перед началом расчета заиления, θ_i - средняя ширина потока в расчетном створе на глубине осадения i -той фракции h_i

$$h_i = \omega_i \frac{W_i - W_{ат}}{Q}, \quad (II,18)$$

W_i - объем воды на расчетном участке, $W_{ат}$ - объем заиления расчетного участка, $S_{ноз,р,i}$ - расчетная бытовая мутность i -той фракции, $\mathcal{E}_i$ - характеристика фракционного состава наносов, выражаемая через i -тую фракцию наносов следующим образом:

$$\mathcal{E}_i = E_{ли} \left(\frac{1}{E_{л1}} + \frac{1}{E_{л2}} + \dots + \frac{1}{E_{ли}} + \frac{1}{E_{ли+1}} + \dots \right). \quad (II,19)$$

Сумма берется по всем фракциям.

ХП. РАСЧЕТ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА ЗА ОДИН ГОД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НОРМЫ СТОКА НАНОСОВ

1. В соответствии с указаниями, данными в предыдущих разделах, устанавливаются значения нормы стока воды и наносов реки в рассматриваемом створе и выбираются типовые хронологические графики расходов воды и наносов, которые приводятся к норме. Пусть норма годового стока наносов равна $P_{гog}$ т/год. Необходимо вычислить, какая часть этого стока наносов пройдет водохранилище транзитом и будет сброшена в нижний бьеф и какая часть удержится водохранилищем. Расчет ведется по отдельным фракциям. Деля все транспортируемые наносы на m фракций и обозначая номер каждой из них через i , записываем

$$P_{гog} = \sum_{i=1}^m P_{i,гog}. \quad (I2,1)$$

Гранулометрический состав транспортируемых наносов выражается процентами $\alpha_{сп,i}$ отдельных фракций, поэтому частный годовой сток наносов i -той фракции определяется равенством

$$P_{i,гog} = \frac{\alpha_{сп,i}}{100} P_{гog}. \quad (I2,2)$$

Гидрограф типового года делится на 3-4 расчетных интервала времени Δt сек. Период наполнения, отвечающий неравенству $Q_p > Q_c$, может быть разделен на 2 расчетных интервала (при значительном различии расходов воды внутри периода) или же принимается за один расчетный интервал. Таким же образом делится и период опорожнения (отвечающий неравенству $Q_p < Q_c$).

Для каждого расчетного интервала (номер интервала обозначается через j) может быть определен приток в водохранилище наносов частной фракции (частный сток наносов i -той фракции через начальный створ) P_{ij} за время Δt_j

$$P_{ij} = \frac{Q_{ср. i}}{100} P_j \quad (12,3)$$

Ниже все величины, относящиеся к начальному створу, будем помечать индексом "нач.", например, $P_{j \text{ нач.}}$, $P_{i \text{ нач.} j}$ и т.д. Величина $P_{j \text{ нач.}}$ находится непосредственно по исправленному хронологическому графику притока наносов.

2. Составим для каждого расчетного интервала уравнение баланса наносов частной фракции для всего водохранилища

$$P_{iaj} = P_{i \text{ нач.} j} - P_{i \text{ кон.} j} \quad (12,4)$$

где $P_{i \text{ нач.} j}$ - сток наносов i -той фракции через начальный створ водохранилища за интервал Δt_j ; $P_{i \text{ кон.} j}$ - то же, через конечный створ водохранилища (т.е. сброс в нижний бьеф); P_{iaj} - количество наносов (в тоннах), аккумулирующихся водохранилищем, и время Δt_j .

Определим величину $P_{i \text{ кон.} j}$

$$P_{i \text{ кон.} j} = S_{i \text{ кон.} j} Q_{ср. \text{ кон.} j} \Delta t_j \cdot 10^{-6}; \quad (12,5)$$

здесь $Q_{ср. \text{ кон.} j}$ - среднее для интервала Δt_j значение расхода воды в конечном створе водохранилища; $S_{i \text{ кон.} j}$ - средняя по интервалу частная мутность i -той фракции в конечном створе; множитель 10^{-6} переводит вес наносов из граммов в тонны.

3. Величина $S_{i \text{ кон.} j}$ вычисляется по приводимому ниже уравнению изменения мутности по длине всего водохранилища. Длина водохранилища в этой формуле выражена в относительных единицах, а именно принято

$$\tilde{L} = \frac{L}{H_{ср}} \quad (12,6)$$

где L — длина водохранилища в м, H_{cp} — его средняя глубина, в эти величины находятся для рассматриваемого отрезка времени Δt_j . Уравнение распределения мутности по длине водохранилища имеет вид

$$S_{i\text{кон}j} = S_{i\text{тр}j} + (S_{i\text{нач}j} - S_{i\text{тр}j})e^{-G_{i*}L}; \quad (12,7)$$

где $S_{i\text{нач}j}$ — средняя за интервал Δt_j частная мутность в начальном створе; $S_{i\text{тр}j}$ — мутность, отвечающая частной транспортирующей способности потока (по содержанию i -той фракции), которая вычисляется по формуле (7,22); e — основание натуральных логарифмов; G_{i*} — безразмерная величина, определяемая равенством

$$G_{i*} = \frac{u_i + k_i}{v_{cp}}, \quad (12,8)$$

где u_i — гидравлическая крупность наносов рассматриваемой фракции, k_i — некоторый параметр, имеющий размерность скорости и учитывающий влияние распределения по вертикали наносов в турбулентном потоке на процесс осаждения наносов. Вычисление k_i производится по формуле

$$k_i = \frac{u_i \Gamma_i}{1 - \Gamma_i} \quad (12,9)$$

(об определении входящего в эту формулу гидромеханического параметра наносов Γ_i для i -той фракции см. раздел УП).

При вычислении $S_{i\text{тр}}$ для интервалов первого года эксплуатации состав донных отложений в водохранилище принимается по составу речного аллювия в русле, а при наличии данных учитываются и состав наносов на пойме, причем осреднение производится по всему водохранилищу (или по участкам).

4. Более простой способ вычисления $S_{i\text{кон}j}$ применяется в весьма распространенном, по-видимому, преимущественно встречающемся при расчете заиления водохранилищ случае, когда транспортирующая способность потока в водохранилище очень мала по сравнению с начальным расходом наносов. Этот случай отвечает следующему предельному условию:

$$\tilde{B}_\delta \geq \frac{1}{\tilde{H}_\delta^{1,5} \Gamma_p^{0,5}}, \quad (12,10)$$

где $\tilde{B}_\delta = \frac{B_\delta}{B_p}, \quad (12,11)$

$$\tilde{H}_\delta = \frac{H_{cp\delta}}{H_{cp p}}; \quad (12,12)$$

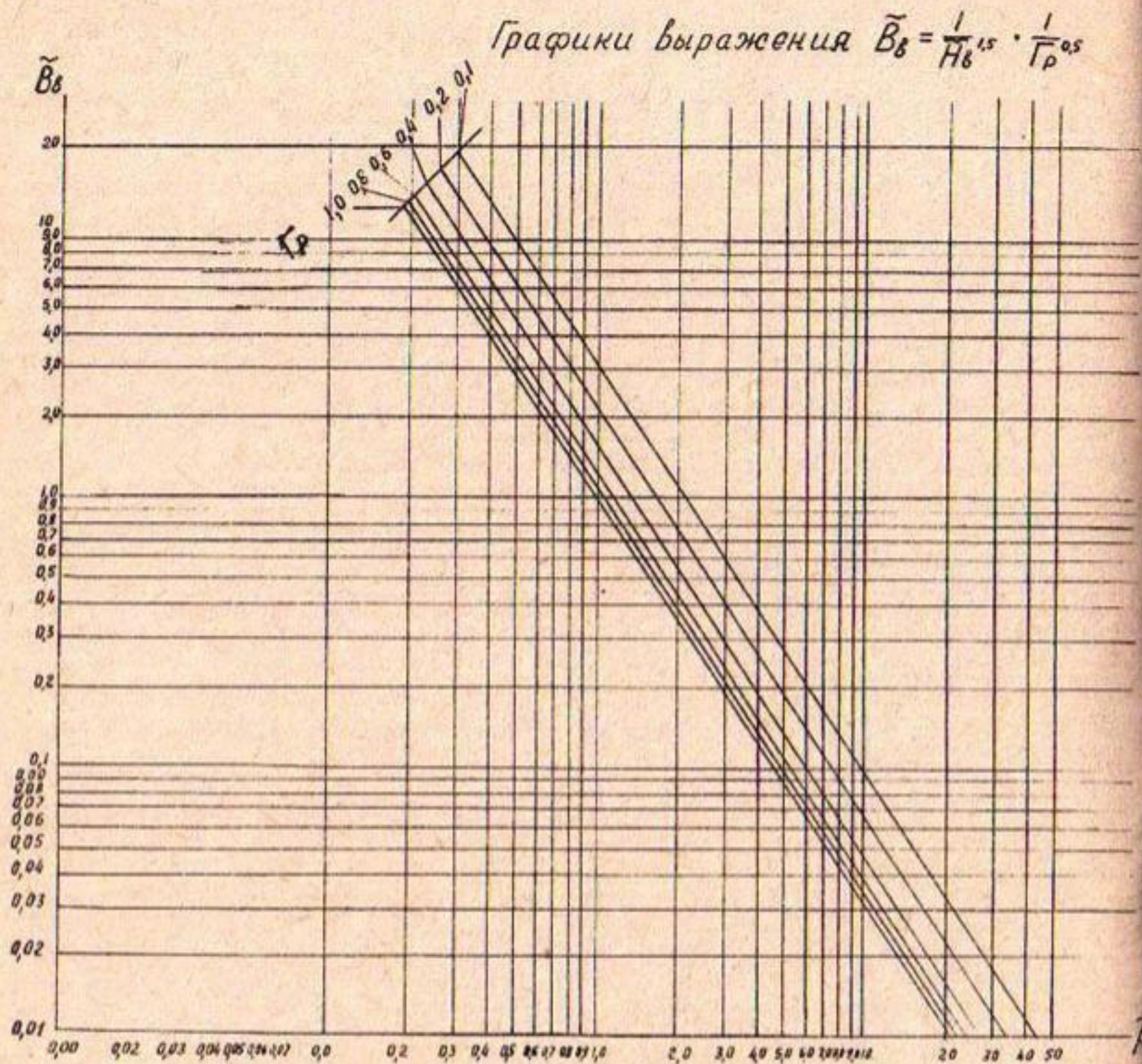


Рис. 13. Графики выражения $\tilde{B}_\delta = \frac{1}{H_\delta^{1.5}} \cdot \frac{1}{\Gamma_p^{0.5}}$

здесь B_δ и B_p – средние значения ширины водохранилища и реки; $H_{ср\delta}$ и $H_{срp}$ – соответственно средние значения глубин водохранилища и реки. Критерий устанавливается по полной транспортирующей способности, поэтому содержащийся в формуле (12,10) гидромеханический параметр наносов Γ_p , вычисленный для речного потока, находится по всем фракциям (см. раздел УП). Для удобства расчета на рис. 13 приведены графики выражения (12,10).

Если относительная ширина водохранилища $\tilde{B}_\delta$ меньше указанного в формуле (12,10) соотношения, что имеет место в большинстве случаев, то $S_{i\text{кон}j}$ определяется по следующей формуле:

$$S_{i\text{кон}j} = S_{i\text{нач}j} \cdot e^{-G_i \tilde{L}} \quad (12,13)$$

Если ввести обозначение

$$z_i = e^{-G_i \bar{L}} \quad (12,14)$$

и выражение (12,14) представить графически (рис. 14), то расчет по формулам (12,7) и (12,13) значительно упрощается. Так, при использовании формулы (12,13) конечная частная мутность будет определяться соотношением

$$S_{i \text{ кон } j} = z_i S_{i \text{ нач } j}, \quad (12,15)$$

величина z_i определяется по графику (рис. 14) как функция G_i и $\bar{L}$.

5. Значение $S_{i \text{ нач } j}$ вычисляется из равенства

$$S_{i \text{ нач } j} = \frac{P_{i \text{ нач } j} \cdot 10^6}{V_{nj}}, \quad (12,16)$$

где V_{nj} — объем притока воды в водохранилище за интервал Δt_j . Очевидно, что

$$V_{nj} = Q_{\text{ср нач } j} \Delta t_j, \quad (12,17)$$

где $Q_{\text{ср нач } j}$ — средний за время Δt_j расход воды через начальный створ.

6. Средняя скорость в водохранилище $V_{\text{ср}}$ м/сек. находится из соотношения

$$V_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср нач } j} + Q_{\text{ср кон } j}}{2 \cdot 0,7 \omega_{\text{ср } j}}, \quad (12,18)$$

где $Q_{\text{ср нач } j}$ и $Q_{\text{ср кон } j}$ — средние за время Δt_j расходы воды соответственно в начальном и конечном сечениях водохранилища; $\omega_{\text{ср } j}$ — средняя величина площади поперечного профиля водохранилища; коэффициент 0,7 введен для ориентировочного учета неполноты охвата транзитным течением поперечного профиля водохранилища.

7. Весовое количество отложившихся в водохранилище за время Δt_j наносов всех m фракций определится следующей суммой:

$$P_{aj} = \sum_{i=1}^m P_{i \text{ нач } j} - 10^{-6} Q_{\text{ср кон } j} \Delta t_j \sum S_{i \text{ кон } j}. \quad (12,19)$$

Заметим, что для некоторых интервалов времени Δt_j вынос наносов за пределы водохранилища будет равен нулю, поэтому вычитаемое правой части формулы (12,19) будет отсутствовать и заиление

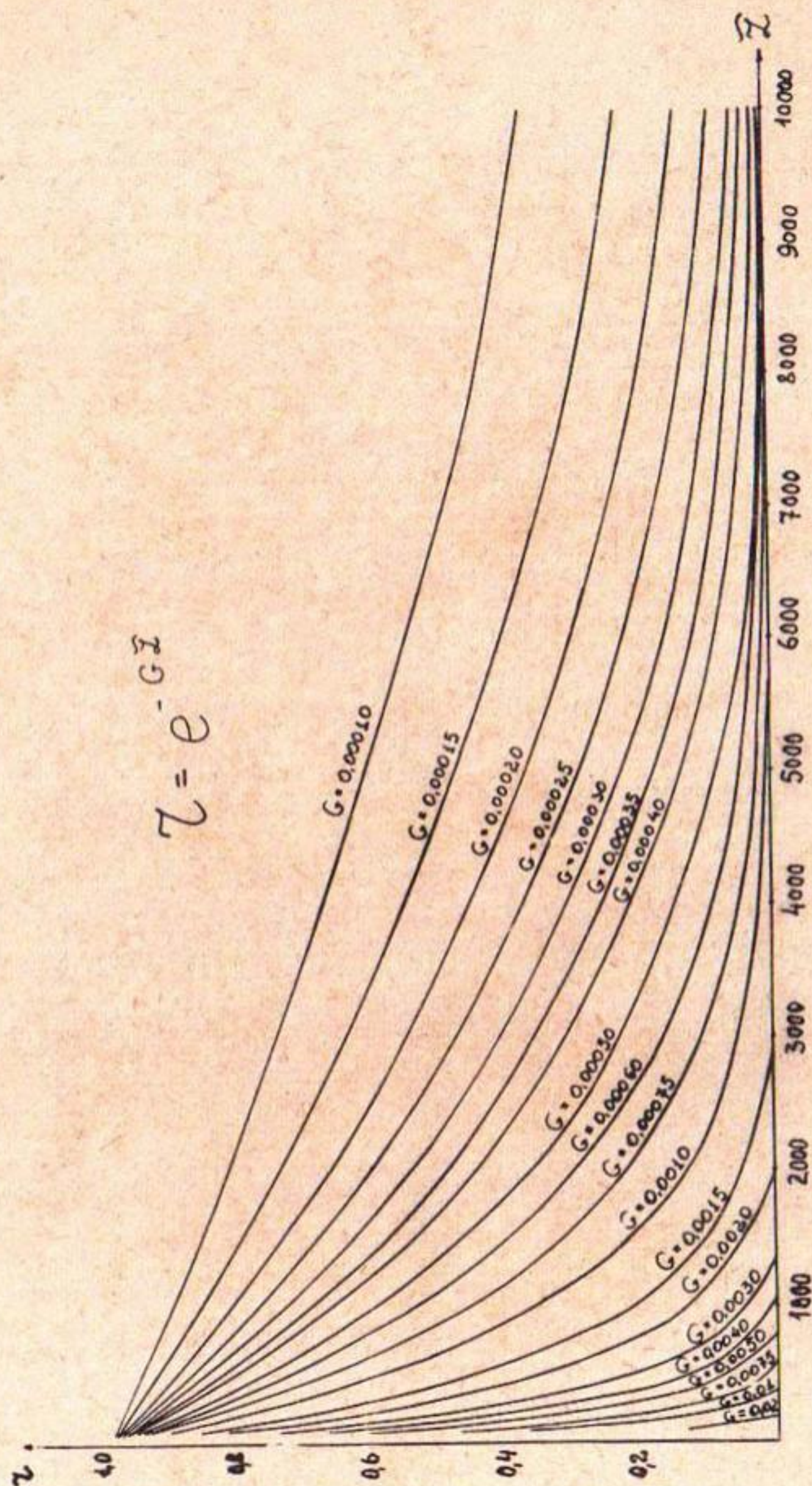


Рис. 14. Графики относительного изменения мутности по длине водохранилища.

для этих интервалов будет равно стоку наносов через начальный створ водохранилища.

8. Годовое количество наносов (в тоннах), отложившихся в водохранилище (годовая аккумуляция), $P_{a\text{ год}}$ определяется суммой

$$P_{a\text{ год}} = \sum_{j=1}^n P_{aj} \quad (12,20)$$

9. Можно вычислить процентное содержание отдельных фракций в составе отложений в водохранилище (за первый год его эксплуатации). Оно определяется следующей формулой, по которой вычисление выполняется для каждой фракции:

$$\alpha_{i\text{ отл}} = \frac{P_{ia\text{ год}}}{P_{a\text{ год}}} = \frac{\sum_{j=1}^m P_{iaj}}{P_{a\text{ год}}} \quad (12,21)$$

10. Зная состав отложений, определяем их объемный вес по табл. II (раздел IX).

11. Объем годового заиления (аккумуляции наносов) будет

$$W_a = \frac{1}{\gamma_{\text{отл}}} P_{a\text{ год}} \quad (12,22)$$

К концу первого года объем водохранилища W уменьшается на величину W_a и становится равным W' ,

$$W' = W - W_a \quad (12,23)$$

12. Эта величина используется в расчетах для следующего года, которые могут быть выполнены по той же схеме, что и для первого года. Необходимый для расчета по формуле (12,7) состав донных отложений в водохранилище получается на основании расчета для предыдущего года [см. формулу (12,21)]. Более простая схема расчета заиления при известном заилении в первом году рассмотрена в разделе XI.

13. Рассмотрим вопрос о назначении уровня воды в водохранилище при расчете заиления. Наиболее низкий уровень наблюдается на водохранилище перед паводком и в первый его период, т.е. когда происходит наполнение водохранилища и главная масса поступающих в него наносов аккумулируется.

Наиболее интенсивный вынос наносов в нижний бьеф имеет место после наполнения водохранилища в период холостого сброса, т.е. обычно при НПУ. Именно поэтому можно рекомендовать при выполнении приближенных расчетов заиления водохранилищ (при использовании

изложенного здесь метода) принимать объем водохранилища, его среднюю глубину, ширину и т.д. отвечающими некоторому среднему положению кривой подпора при НПУ. Заметим, что при выполнении детальных расчетов заиления, производимых по участкам водохранилища, учитываются конкретные уровни у плотины, соответствующие принятым значениям расходов и кривых подпора.

ХШ. РАСЧЕТ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ УЧЕТЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТОКА НАНОСОВ

1. При использовании изложенной выше методики может быть выполнен расчет заиления при учете многолетней изменчивости стока наносов. Для этого в соответствии с указаниями, данными в разделе У, выделяются циклы, содержащие годы с различной обеспеченностью годового стока наносов, а именно годы со средней величиной стока наносов (N_c), высокими и низкими значениями стока наносов (N_b и N_n), годы с весьма высоким стоком наносов (N_{bb}). Сумма всех этих лет N дает среднее число лет полного цикла N .

2. Для каждой из частей цикла назначаются определенные величины стока воды и наносов и применяются типовые хронологические графики стока воды и наносов, обеспечивающие получение принятых годовых значений стока воды и наносов.

3. Для каждой части цикла выполняется расчет заиления по схеме, изложенной в предыдущем разделе. Сперва расчет производится для лет с весьма высоким стоком наносов, затем для лет с высоким стоком наносов, со средним и т.д. По окончании каждого расчета за один год вносится изменение в объем водохранилища, соответствующее полученному значению. После этого для следующего года производится расчет с учетом изменения морфометрии и гидравлики водохранилища.

4. Закончив расчет для одного цикла, в такой же последовательности производим расчет для второго цикла и т.д. Вычисления прекращаются при получении объема заиления за заданное наперед число лет (включающих несколько циклов) или при установлении времени полного заиления водохранилища.

ХІУ. РАСЧЕТ ОТЛОЖЕНИЯ ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

1. Расчет занесения водохранилища влекомыми наносами для первого года эксплуатации целесообразно производить по тем же расчетным интервалам, выделенным на типовом гидрографе стока по со-

отношению Q_p и Q_c , что и расчет заиления взвешенными наносами. В зависимости от результатов анализа многолетней изменчивости стока воды и взвешенных наносов и предварительной оценки времени полного заиления расчет занесения выполняется либо по норме стока наносов, либо по величине стока заданной обеспеченности. Соответственно этому расчетные величины стока воды за интервалы, выделенные на типовом гидрографе, должны быть приведены к норме или к величине заданной обеспеченности.

2. Для приближенной оценки количества отложившихся в водохранилище влекомых наносов можно ограничиться расчетом для периода половодья, когда в водохранилище поступает основная масса наносов крупных фракций. При этом можно допустить в отношении крупных водохранилищ, что все поступившие наносы крупных фракций остаются в водохранилище.

3. Из небольших горных водохранилищ происходит частичный сброс наносов в нижний бьеф при нормальном режиме эксплуатации (через донные водовыпуски под шитами, а также при переливе через шиты на низконапорных сооружениях); кроме того, производятся специальные промывки с целью удаления крупных фракций. Оптимальный режим промывок, обеспечивающий наибольшее удаление донных наносов, устанавливается обычно экспериментальным путем. Вопрос о расчете промывок требует специального рассмотрения. Ниже даются рекомендации по расчету заиления при отсутствии искусственных промывок водохранилищ в предположении, что сброс наносов в нижний бьеф определяется осредненными гидравлическими характеристиками потока в конечном створе (у плотины). Такой подход к расчету отвечает наиболее неблагоприятному случаю аккумуляции донных наносов, т.к. не учитывает возможности выноса влекомых наносов из водохранилищ непосредственно в придонных слоях.

4. Объем наносов крупных фракций, отложенных (аккумулированных) в первый год работы водохранилища, получается суммированием объемов отложений за расчетные периоды

$$W_{a \text{ дн } 1} = \sum_{j=1}^m W_{a \text{ дн } j}, \quad (I4,1)$$

где j - номер расчетного интервала, m - число интервалов. В частном случае может быть принято, что объем отложений первого года равен объему отложений за паводок этого года, т.е.

$$W_{a \text{ дн } 1} = W_{a \text{ дн пав}}. \quad (I4,2)$$

5. Расчет объема наносов крупных фракций, отложившихся в водохранилище за выделенный интервал времени, производится по балансу расхода донных наносов в начальном и конечном (у плотины) створах

$$W_{a \text{ дн } j} = \frac{10^{-3}}{\gamma_{отл}} (R_{\text{дн нач } j} - R_{\text{дн кон } j}) \Delta t_j, \quad (14,3)$$

где $W_{a \text{ дн } j}$ - объем отложений донных наносов, в м^3 ; Δt_j - интервал времени, в сек.; $R_{\text{дн нач } j}$ и $R_{\text{дн кон } j}$ - расход донных наносов в начальном и конечном створах, в кг/сек. , за расчетный интервал j ; $\gamma_{отл}$ - объемный вес отложений, в т/м^3 .

6. Расчет расхода влекомых наносов в начальном и конечном створах для каждого интервала времени может производиться по приведенным в разделе VIII формулам Шамова, Доу Го-жэня и Егiazарова. Формулу Егiazарова рекомендуется применять в преобразованном виде, а именно

$$R_{\text{дн } j} = 24 Q_j \frac{v_j}{C \sqrt{H_j}} \left(\frac{d_{\text{max}}}{d_{\text{cp}}} - 1 \right) \text{ кг/сек.} \quad (14,4)$$

Расход воды $Q_{\text{нач } j}$, проходящий через начальный створ, принимается как средний за расчетный интервал по типовому гидрографу; для конечного створа $Q_{\text{кон } j}$ принимается в соответствии с рекомендациями раздела VI. Величины $v_j = \frac{Q_j}{S}$ и $H = \frac{S^2}{B}$ вычисляются для начального и конечного створов при условии наполнения водохранилища до НПУ. Наибольший диаметр наносов d_{max} , транспортируемых в верхнем бьефе через начальный створ и через створ перед плотиной, определяется по формуле Шамова (8,4)

$$d_{\text{max}} = \frac{v_j^3}{50,65 H_j^{1/2}} \quad (14,5)$$

путем подстановки соответствующих значений v_j и H_j для начального и конечного створов.

Средний диаметр влекомых наносов $d_{\text{cp нач}}$, транспортируемых через верхний створ, принимается по данным крупности донных отложений реки до создания водохранилища, при отсечении верхней части гранулометрической кривой по $d = d_{\text{max нач}}$, вычисленному по формуле (14,5) для верхнего створа. Средний диаметр влекомых наносов, транспортируемых от начального створа до плотины, определяется по той же гранулометрической кривой при отсечении ее верхней части по $d = d_{\text{max кон}}$, вычисленному также по формуле (14,5) для условий протекания через конечный створ.

7. Объем отложений донных наносов за первый год эксплуатации, полученный по соотношениям (I4,1 или I4,2), складывается с объемом отложений взвешенных наносов за тот же год; полученная суммарная величина отложений используется для дальнейших расчетов хронологического хода заиления и занесения водоема по формулам Шамова (II,1) или Лапшенкова (II,4 или I5).

ХУ. РАСЧЕТ ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА ПО УЧАСТКАМ

1. Существующие методы расчета заиления водохранилищ по участкам отличаются довольно значительной трудоемкостью и тем не менее являются весьма приближенными. Наиболее существенным недостатком указанных методов является отсутствие каких-либо рекомендаций по надежной оценке течений в водохранилищах и необходимость вследствие этого ограничиваться чрезвычайно грубой схематизацией.

Пока задача расчета течений в водохранилищах не будет более или менее удовлетворительно решена, до тех пор любой, даже и совершенный метод расчета заиления, не сможет дать вполне надежного результата. Поэтому в настоящее время детальные расчеты заиления крупных водохранилищ по участкам неизбежно содержат некоторую неопределенность и должны включать элемент научного исследования. Недаром при решении такой задачи иногда прибегают к лабораторному моделированию. Естественно, что указанные обстоятельства исключают возможность стандартизации. В настоящем разделе даются лишь самые общие указания, которые окажутся полезными при использовании любого из упоминаемых ниже методов расчета, а также при постановке модельных исследований.

2. Приближенный расчет заиления водохранилища по участкам может быть выполнен при использовании методики, изложенной в разделе XII. Предварительно на плане водохранилища назначается несколько расчетных профилей; первый из них должен находиться вне зоны подпора и будет являться начальным, а последний — перед створом плотины (конечный створ). В зоне выклинивания подпора и прилегающей части водохранилища поперечники следует располагать чаще, а в остальной части — реже.

Расчет позволяет получить изменение мутности от начального до каждого последующего поперечного профиля, который условно принимается за конечный. По расчету для последнего профиля, совпадающего с плотинной, получаем заиление всего водохранилища; расчет

для предпоследнего профиля дает заиление на той части водохранилища, которая заключена между начальным и предпоследним профилями. Заиление на участке между последним и предпоследним профилями находится по разности заиления всего водохранилища и его части, замыкаемой предпоследним профилем. В таком же порядке выполняется расчет для всех остальных участков водохранилища, ограниченных расчетными профилями.

Такой прием расчета заиления водохранилищ по участкам предложен В.С. Лапшенковым [15], но значения мутности в конечных створах определяются им иным способом, а именно тем, который изложен в разделе XI.

3. Для расчета заиления водохранилища по участкам могут применяться и весьма сложные методы (А. В. Караушева 1965 г. [11] и И.А. Шнеера 1964 г. [25]), позволяющие достаточно детально учесть особенности отдельных участков водоема. Метод Караушева дает возможность оценить заиление в пределах водоворотных зон, если положение и основные характеристики последних удастся выяснить по материалам натурных или лабораторных исследований. Детальное изложение методов дано в упомянутых работах [11, 25].

4. Рассмотренный в конце раздела УП метод для оценки транспортирующей способности и расчета заиления водохранилищ с использованием натурных данных по мутности потоков и расходам наносов (метод К.И. Россинского и И.А. Кузьмина) обязательно предполагает деление водохранилища на расчетные участки, а весь расчет заиления выполняется по отдельным участкам водохранилища [20].

5. Расчет заиления по участкам производится с учетом многолетней и внутригодовой изменчивости стока наносов и воды. Расчет ведется по отдельным расчетным интервалам времени, каждый из которых характеризуется особыми величинами расходов воды и наносов, уровнями, средними глубинами и скоростями на участках или профилях водохранилища и т.д. Расчетные интервалы Δt_j принимаются различными для разных фаз режима.

6. Последовательность расчета такова:

1) Подготовка исходных данных, выделение расчетных интервалов времени, вычисление всех величин, входящих в расчетные формулы для всех расчетных интервалов и для расчетных участков (или профилей); построение вспомогательных графиков для участков (графиков средних глубин, ширины, коэффициентов Шези, модулей сопротивления и т.д., как функций от уровня); эти графики исправляются в процессе расчета заиления.

2) Построение кривых свободной поверхности для всех интервалов времени Δt_j , взаимно отличающихся по расходам воды и уровням у плотины (в связи с сезонной сработкой).

3) Построение кривой свободной поверхности водохранилища для первого расчетного интервала времени.

4) Расчет заиления по участкам (профилям) и получение новой формы продольного профиля дна водохранилища.

5) Исправление указанных в п. 1 графиков путем изменения высот ординат графиков на величину слоя заиления, который условно предполагается равномерно распределенным по ширине водохранилища (за исключением зоны водоворота – в методе Караушева [11]); такое исправление графиков выполняется в том случае, если вычисленное заиление за предыдущий или суммарно за все предыдущие интервалы времени оказывается превышающим 1/10 средней глубины.

6) Построение кривой свободной поверхности для следующего интервала времени.

7) Получение новых значений (по данным расчета заиления) гранулометрического состава донных отложений; это необходимо при использовании метода Караушева.

8) Расчет заиления для следующего расчетного интервала.

Далее расчет продолжается в такой же последовательности.

7. Для построения кривых свободной поверхности рекомендует-ся метод Н.А. Рахманова (изложение этого метода см. в работах М.Д. Чертоусова [23] и А.В. Караушева [9]). Метод Н.А. Рахманова позволяет легко осуществлять учет процесса заиления указанным выше способом смещения ординат графиков модуля сопротивления. Построение кривых водной поверхности для зимних условий следует выполнять методом, основанным на введении переходных множителей к графикам модулей сопротивления от летних к зимним условиям; этот метод изложен в упомянутой выше книге [9]. Заметим, что расчет для зимних условий следует выполнять лишь в тех крайне редких случаях, когда в бассейне реки возможны значительные зимние паводки, осуществляющие большие выносы наносов в водохранилища, находящиеся в это время под ледяным покровом.

ХУІ. РАСЧЕТ ЗАИЛЕНИЯ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПРУДОВ

І. Продолжительность заиления малых водоемов-прудов определяется не только количеством наносов, ежегодно поступающих в них вследствие смыва с водосбора и размыва русла водотока ($P_{\text{роз}}$), но и их наносоудерживающей способностью (P_a), равной отноше-

ний годового количества отложившихся в пруде наносов (P_a) к среднегодовому стоку наносов в пруд (P_{reg}). Наносоудерживающая способность прудов зависит в основном от относительной емкости пруда $\tilde{W} = \frac{W}{V_p}$, где W — объем пруда, V_p — годовой объем притока воды в пруд. Большинство прудов имеет небольшую относительную емкость ($\tilde{W} < 20\%$). Это приводит к тому, что при сбросах воды в весенний период количество оседающих в прудах наносов уменьшается за счет транзита через водоем и выноса мелких фракций в нижний бьеф.

2. Для расчета заиления прудов необходимы сведения о средней многолетней величине годового стока воды и наносов в пруд, об объеме пруда и о размере сбросов из пруда в нижний бьеф. Объем пруда задается проектом. Сток воды в пруд определяется по карте среднего годового стока, составленной К.П. Воскресенским [2]. Поскольку карта Воскресенского относится к большим площадям водосборов, при ее использовании для малых площадей требуется введение соответствующей поправки. Мутность воды притока в пруд рассчитывается путем умножения мутности, определенной по карте мутности или принятой по аналогии с соседней рекой, на поправочные коэффициенты, взятые по табл. 2. Сток наносов P_{reg} подсчитывается как произведение мутности на объем стока воды. Определяется, какая часть наносов притока ежегодно будет осаждаться в пруде. Для этого используется табл. 13. По относительной емкости пруда $\tilde{W}$ находится относительная наносоудерживающая способность $\tilde{P}_a$. Годовой вес отложений находится по формуле

$$P_a = \tilde{P}_a P_{reg} \quad \text{т/год} \quad (16,1)$$

Для определения объема отложений величину P_a , полученную в тоннах, следует разделить на объемный вес отложений. Объемный вес для илистого состава наносов может быть принят равным $0,8 \text{ т/м}^3$, для супесчаного — $1,0 \text{ т/м}^3$. Подробнее об объемных весах отложений см. в разделе IX.

Для последующих лет заиление рассчитывается с учетом прошедшего за предыдущие годы суммарного уменьшения объема пруда. Последовательный расчет позволяет найти срок службы пруда.

3. Для расчета заиления малых водохранилищ и прудов также может быть рекомендован разработанный в ГГИ А.В. Караузовым более общий метод, основанный на теоретическом рассмотрении процесса заиления. Метод применим к расчету водоемов, расположенных на временных водотоках аридных территорий и в других климатических зонах на относительно небольших водотоках, отличающихся кратко-

временным паводком, в течение которого транспортируется главная масса наносов—80–90% и более их годового стока.

Необходимым условием применимости метода является наличие данных о гранулометрическом составе транспортируемых потоком, в частности, взвешенных наносов. При отсутствии таких данных может использоваться только метод, изложенный выше.

Таблица 13

Связь между относительной наносоудерживающей способностью водоемов и их относительной емкостью по натурным данным для различных физико-географических условий

Территория	Характеристика состава наносов	Наносоудерживающая способность $\bar{P}_a$							
		при следующих относительных емкостях $\bar{W}$:							
		1,0	0,95	0,80	0,70	0,50	0,30	0,10	0,05
Украина [77]	глинистые	—	0,99	0,98	—	0,96	0,94	0,84	0,70
	мелкопесчаные	—	—	—	—	—	—	0,99	0,85
Северный Кавказ [17]	илисто-глинистые	1,0	0,96	0,86	0,78	0,58	0,32	—	—

С началом паводочного стока происходит наполнение водоема. При достижении определенного уровня (в большинстве случаев НПУ) начинается сброс воды в нижний бьеф и имеет место транзитный перенос части наносов через водоем. Сброс наносов продолжается или до прекращения сброса воды, или до практически полного осветления воды в реке, питающей водоем; последнее может иметь место при меженных уровнях в случае, если меженный сток реки (ручья) мал.

Продолжительность периода сброса паводочных вод будем обозначать через T_c . Период T_c определяется приблизительно следующим образом. Строится типовой гидрограф реки (ручья), на которой проектируется водоем. Объем стока по типовому гидрографу должен совпадать с нормой стока (с приведением к норме см. раздел У1). Непосредственно по гидрографу находится общая продолжительность паводочного стока $T_{пав}$. Если емкость водоема,

заполняемую водой в период паводка, обозначить через $V_{акк}$, то можно написать

$$V_{акк} = \int_0^{T_{пав} - T_c} Q(t) dt, \quad (16,2)$$

где $Q(t)$ — гидрограф — хронологический график расхода воды Q ; интеграл берется в пределах от начала весеннего половодья (весеннего стока) $t=0$ до момента начала сброса $t = T_{пав} - T_c$. Интегрирование производится с помощью планиметра или путем подсчета по трапециям. Решение выполняется путем подбора: меняя на графике положение точки $t = T_{пав} - T_c$, добиваются выполнения равенства (16,2). Это позволяет найти значение T_c .

В промежуток времени $T_{пав} - T_c$ все наносы, приносимые паводочным стоком, аккумулируются в водоеме, а в течение времени T_c часть наносов аккумулируется, а другая часть (преимущественно наиболее мелкие) выносятся в нижний бьеф.

Сброс наносов определяется расходом воды, сбрасываемой в нижний бьеф, мутностью этой воды, т.е. мутностью воды в конце верхнего бьефа (у плотин), и продолжительностью периода сброса паводочных вод T_c . Рассмотрим процесс осаждения для отдельной фракции наносов, которую будем обозначать индексом i . Частная мутность отдельной (i -той) фракции наносов в конце водохранилища (пруда) определяется приближенной формулой

$$\beta_{кон i} = \beta_{нач i} e^{-\frac{W u_i T_c}{H_{cp} (V_n - W)}}, \quad (16,3)$$

где $\beta_{нач i}$ — средняя мутность i -той фракции в начальном створе водоема, выше влияния подпора; W — объем пруда, принимаемый равным $V_{акк}$; средняя глубина пруда обозначена через H_{cp} ; V_n — общий объем паводочного стока реки (ручья); u_i — гидравлическая крупность наносов i -той фракции.

Принимаем паводочный сток наносов i -той фракции равным полному годовому стоку наносов этой фракции $P_{rog i}$ т/год. Очевидно, что полный сток наносов всех фракций P_{rog} выражается суммой

$$P_{rog} = \sum_{i=1}^m P_{rog i}, \quad (16,4)$$

где m — число всех транспортируемых фракций. Количество аккумулирующихся в водоеме наносов i -той фракции за период паводка (практически за год) в весовом выражении, обозначаемое че-

$$\bar{P}_a = 1 - (1 - \bar{W}) e^{-\frac{\bar{W}}{1-\bar{W}}}$$

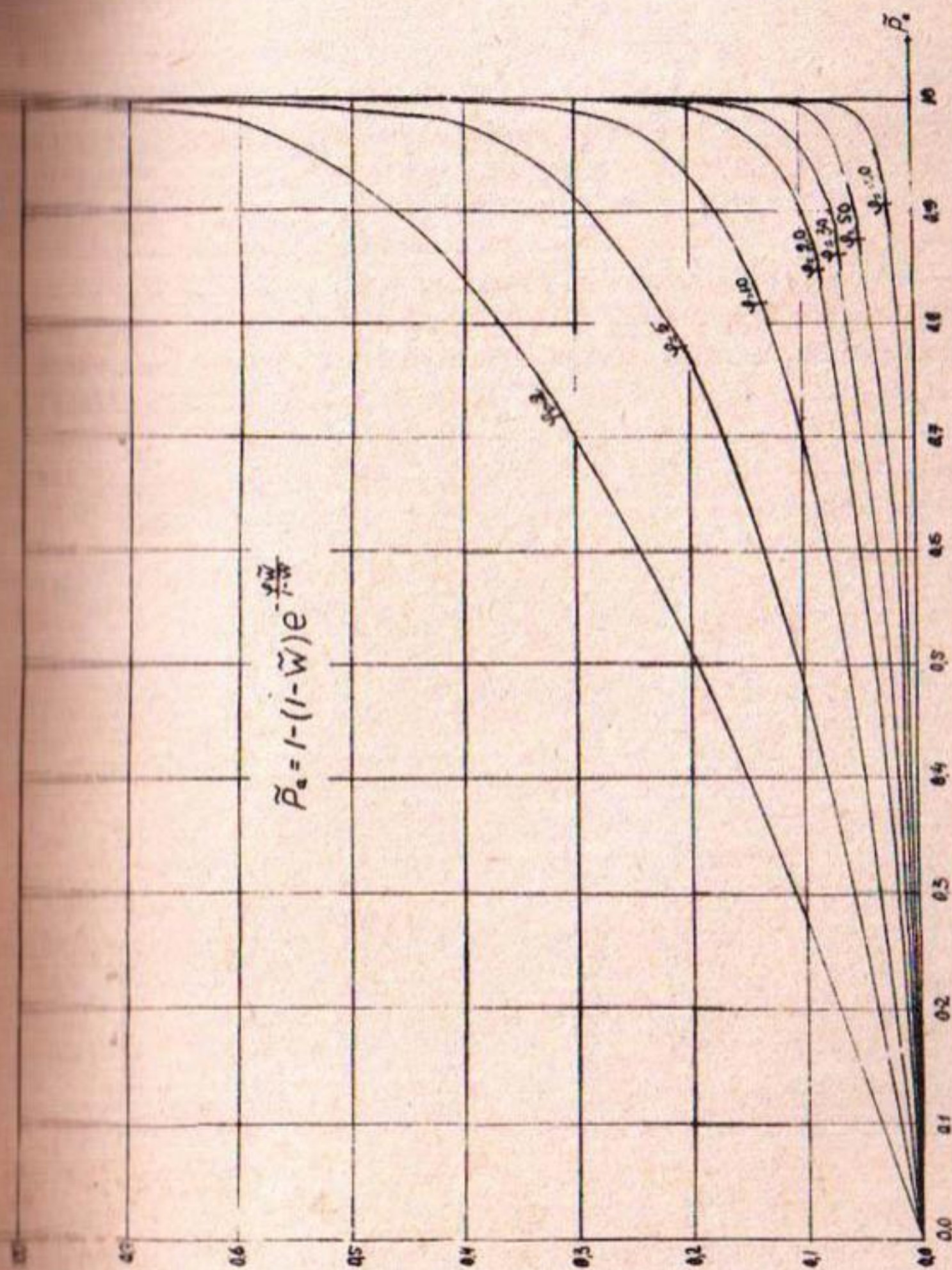


Рис. 15. Графики зависимости относительной наносодерживающей способности водохранилища (пруда) $\bar{P}_a$ от его относительной емкости $\bar{W}$ по Караузову.

рез P_{ai} т/год, выражается таким уравнением:

$$P_{ai} = P_{rogi} - S_{нач i} (V_n - W) \epsilon^{-\frac{W u_i T_c}{H_{\varphi} (V_n^2 - W)}}. \quad (16,5)$$

Величину $\tilde{P}_a$ можно записать для отдельной фракции наносов

$$\tilde{P}_{ai} = \frac{P_{ai}}{P_{rogi}}. \quad (16,6)$$

Уравнение (16,5) приводится к следующей расчетной формуле:

$$\tilde{P}_{ai} = 1 - (1 - \tilde{W}) \epsilon^{-\frac{\varphi_i \tilde{W}}{1 - \tilde{W}}}, \quad (16,7)$$

где

$$\varphi_i = \frac{u_i T_c}{H_{cp}}. \quad (16,8)$$

φ_i является единственным параметром уравнения. Для каждой фракции наносов будем иметь свое значение φ_i . Входящие в выражение (16,8) величины легко могут быть определены для проектируемого водоема по данным самого проектирования и по данным гидрологических обследований. В крайнем случае могут привлекаться материалы по реке-аналогу.

Заметим, что уравнение (16,7) соответствует виду известной кривой Брена [27], ранее широко использовавшейся для расчета заиления прудов. Уравнение является более общим, чем эта кривая; оно показывает, что вид кривой $P_{ai} = f(W)$ должен быть различным для разных прудов и зависит от крупности транспортируемых наносов. Эта кривая изменяется и для конкретного водоема в процессе его заиления. Брен же дает одну единственную кривую для различных прудов, не учитывая к тому же состава наносов.

Для упрощения расчета по уравнению (16,7) построена серия графиков (рис. 15); каждая кривая отвечает определенному параметру φ_i .

4. Практически расчет заиления выполняется следующим образом. Находятся исходные величины W , V_n , P_{rog} , T_c , H_{cp} , а также значения P_{rogi} и u_i и вычисляются $\tilde{W}$ и φ_i . По уравнению (16,7) или по графику (рис. 15) находится $\tilde{P}_{ai}$ за один год и вычисляется P_{ai} т/год по формуле (16,1). Суммируются значения P_{ai} по всем фракциям.

это дает полную аккумуляцию наносов P_a за год в водоеме

$$P_a = \sum_{i=1}^m P_{ai} \quad (16,9)$$

По таблице объемных весов (напомним, что это можно сделать лишь приближенно) находится объемный вес отложений $\gamma_{отл}$. Годовой объем отложений (аккумуляции) наносов W_a находится, как указывалось, по соотношению

$$W_a = \frac{1}{\gamma_{отл}} P_a \quad (16,10)$$

Далее приступают к расчету для второго года эксплуатации водоема. Если объем W_a соизмерим с объемом водоема, то следует выяснить, не изменятся ли ощутимо величины W и H_{cp} ; если нет, то для второго года расчет выполняется при использовании прежних значений параметра φ_i и величины W . При заметном изменении объема пруда W (более 10%) соответствующие исходные величины пересчитываются.

Если получаемые для отдельных лет значения W_a относительно малы, то учет влияния заиления на размер пруда осуществляется по группам лет, за которые производится суммирование W_a . Такой учет является обязательным; именно он позволяет получать постепенное затухание процесса заиления.

ХУП. РАСЧЕТ МУТНОСТИ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ПРИ УЧЕТЕ ВОЛНОВОГО ВЗМУЧИВАНИЯ

1. При выполнении расчета заиления водохранилищ для каждого расчетного интервала времени определяются значения мутности водных масс в конце водохранилища (у плотины) или на ряде расчетных участков (створов) в зависимости от того, с какой степенью детальности выполняется расчет. Таким образом, оказывается возможным получить некоторое представление о режиме и распределении мутности в водохранилище. Получаемая схема распределения и режима мутности оказывается, однако, весьма неполной, так как при ее получении учитывается только процесс переноса и осаждения наносов, принесенных в водохранилище вместе со стоком воды. В действительности, формирование мутности водных масс водохранилищ связано с различными факторами и, в частности, с явлением вторичного взмучивания (обусловленного воздействием течений и ветрового волнения на дно), а также с береговыми процессами. Степень влияния перечисленных факторов на режим мутности изменяется как во времени, так и по акватории водохранилища. Характеристики режима и

распределения мутности, получаемые по расчету заиления, могут быть отнесены только к периодам штилей или относительно слабого волнения. Для периодов значительного и сильного волнения представление о мутности водных масс водохранилищ может быть получено только при учете волнового взмучивания.

2. По режиму мутности каждое водохранилище делится на три зоны: 1) нижнюю, примыкающую к плотине и охватывающую большую часть водохранилища, 2) промежуточную и 3) верхнюю (вместе с зоной выклинивания подпора). В каждой из перечисленных зон может быть выделена отличающаяся особым режимом прибрежная область, в которой очень сильно сказывается влияние ветро-волнового фактора на взмучивание и перемещение наносов.

В верхней зоне основное влияние на перемещение наносов оказывают сточные течения. В промежуточной зоне заметную роль в формировании мутности играют как сточные, так и ветровые течения; их влияние неодинаково в различные периоды режима. В нижней зоне водохранилища значительную роль приобретает ветро-волновой фактор.

Мелководная прибрежная область (полоса) испытывает особенно сильное волновое воздействие. Со стороны открытой части она ограничивается линией, где глубина равна половине длины волны. Граница этой области подвижна и изменяется при разном волнении.

В прибрежной полосе можно выделить три зоны, отличающиеся как по условиям формирования, так и по характеру распределения мутности во время волнения.

Наибольшая мутность во время волнения наблюдается в первой прибрежной зоне – в зоне волноприбоя, где разрушаются волны и благодаря высокой турбулентности и большим скоростям течения происходит очень сильное взмучивание. За внешнюю границу этой зоны принимается линия, где отношение высоты волны к глубине превышает 0,7. Это соответствует действительным условиям начала разрушения волн.

Меньшая, но еще довольно значительная мутность наблюдается во второй прибрежной зоне, расположенной за пределами волноприбойной и занимающей прибрежную полосу до свала глубин. Здесь волновое взмучивание слабее, чем в зоне волноприбоя. Во вторую зону часто выносятся более мутные воды из зоны волноприбоя.

Третья прибрежная зона – зона относительно глубокой воды, где орбитальные скорости у дна близки к нулю. Взмучивание здесь оказывается связанным практически лишь с течением.

3. Для расчетов мутности в глубоководной зоне рекомендуется метод А.В. Караушева [10], разработанный на основе диффузионной

теории взвешивания наносов и учитывающий волновое взмучивание. Метод проверен на материалах специальных наблюдений на Кременчугском, а также Горьковском и Кайрак-Кумском водохранилищах. Проверка и усовершенствование метода выполнены А.Я. Шварцман. В ее работе [25] дано детальное изложение метода.

Основная расчетная формула имеет вид

$$S_{тр} = \Gamma \cdot S_{взм} \quad \text{г/м}^3, \quad (17,1)$$

где $S_{тр}$ — мутность, отвечающая условию насыщенности наносами, т.е. транспортирующей способности, Γ — гидромеханический параметр наносов, $S_{взм}$ — мутность взмыва. Гидромеханический параметр определяется при учете фракционного состава взвешиваемых фракций донных отложений (грунтов), если частицы крупнее 0,1 мм составляют менее 25% от общего состава взвешиваемых фракций, или по среднему значению гидравлической крупности, если эти частицы составляют более 25%. Формула для вычисления Γ по составу донных отложений приведена в разделе УП. Там же изложен способ выделения взвешиваемых фракций из состава донных отложений. Частное значение Γ_i находится по формуле

$$\Gamma_i = \Phi_i B_i^* \quad (17,2)$$

где Φ_i — функция величины ε_i , находящаяся по табл. 7 (раздел УП), а B_i^* — функция двух переменных — коэффициента Шези C и безразмерной величины G_i

$$G_i = \frac{u_i}{|V_{cp}|} \quad (17,3)$$

$|V_{cp}|$ — абсолютная величина средней скорости транзитного течения, определяемая с учетом ветрового воздействия на водную поверхность. Функция B_i^* определяется по табл. 14 в зависимости от C и G_i .

$$\varepsilon_i = \frac{u_i}{W_n^*} \quad (17,4)$$

здесь W_n^* — среднее абсолютное значение пульсационной скорости у дна при наличии волнения и течений. Если расчет ведется не по фракционному составу наносов, а по средней гидравлической крупности u , то в формулах (17,3) и (17,4) значения u_i заменяются величиной u . В соответствии с этим Φ , B^* и Γ в формуле (17,2) пишутся без индекса i . Как и выше, Φ и B^* находятся по табл. 7 и 14. Получаемое при этом по формуле (17,2) значение Γ оказывается уже общим и непосредственно используется при вычислении $S_{тр}$ по формуле (17,1).

Таблица 14

Значения функции $B^*(C, G)$

$\begin{array}{c} C \\ \backslash \\ G \end{array}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0,002	-	0,956	0,921	0,867	0,805	0,750	0,703	0,673	0,654	0,625	0,606	-
0,05	0,710	0,410	0,220	0,130	0,070	0,050	0,050	0,045	0,041	0,037	0,032	0,030
0,10	0,510	0,200	0,100	0,060	0,030	0,030	0,023	0,020	0,018	0,017	0,016	0,015
0,15	0,387	0,137	0,062	0,036	0,025	0,017	0,015	0,014	0,013	0,012	0,011	0,010
0,20	0,300	0,094	0,045	0,026	0,016	0,012	0,011	0,010	0,0090	0,0090	0,0080	0,0070
0,25	0,241	0,074	0,035	0,021	0,014	0,010	0,0090	0,0080	0,0070	0,0070	0,0062	0,0061
0,30	0,198	0,060	0,029	0,018	0,012	0,0086	0,0080	0,0070	0,0060	0,0055	0,0050	0,0048
0,35	0,170	0,051	0,026	0,015	0,010	0,0070	0,0060	0,0060	0,0050	0,0050	0,0047	0,0043
0,40	0,143	0,044	0,022	0,013	0,0090	0,0060	0,0060	0,0050	0,0050	0,0040	0,0039	0,0039
0,45	0,126	0,039	0,019	0,011	0,0070	0,0060	0,0050	0,0045	0,0043	0,0040	0,0035	0,0035
0,50	0,110	0,034	0,017	0,010	0,0060	0,0050	0,0045	0,0043	0,0040	0,0031	0,0030	0,0030

величина W_N^* приближенно вычисляется по зависимости

$$W_N^* = \frac{|V_{cp}|}{\sqrt{N}} + \frac{|V_{x\text{орб}H}|}{\sqrt{N_{\text{волн}}}}, \quad (17,5)$$

где $|V_{x\text{орб}H}|$ - средняя абсолютная величина продольной составляющей орбитальной скорости у дна (формула для ее вычисления приводится ниже), N - безразмерное характеристическое число турбулентного потока. Значение N может быть вычислено по формуле

$$N = \frac{Mc}{g} \quad (17,6)$$

(подробнее см. в разделе УП). $N_{\text{волн}}$ - безразмерное характеристическое число волнового потока, которое в первом приближении может быть определено по равенству

$$N_{\text{волн}} = \frac{2,4 \cdot 10^3}{h}, \quad (17,7)$$

где h - высота волны 10%-ной обеспеченности. Коэффициент Шези вычисляется по формуле Штриклера-Маннинга

$$C = 33 \left(\frac{H}{d_s} \right)^{1/6}; \quad (17,8)$$

d_s - эффективный диаметр донных отложений, определяемый по интегральной кривой гранулометрического состава отложений как диаметр частиц, являющийся нижней границей наиболее крупных фракций, составляющих 10% от общего состава отложений.

Мутность взмыва ($S_{\text{взм}}$) вычисляется с учетом влияния волнения и течений на взмыв. Волнение учитывается введением в формулу величины орбитальной скорости у дна $|V_{x\text{орб}H}|$. Формула имеет вид

$$S_{\text{взм}} = 150 \frac{N}{H} (|V_N| + |V_{x\text{орб}H}|)^2 \text{ г/м}^3. \quad (17,9)$$

Орбитальная скорость определяется зависимостью

$$|V_{x\text{орб}H}| = \frac{2h}{T_0 \sinh \frac{2\pi H}{\ell}}, \quad \text{м/сек}, \quad (17,10)$$

где h - высота волны 10%-ной обеспеченности, м, ℓ - длина волны, м, T_0 - период волны, сек., H - глубина воды, м, $|V_N|$ - абсолютная величина скорости течения у дна, м/сек.

4. Для прибрежной зоны водохранилища (волноприбойная зона и примыкающая к ней мелководная часть прибрежной полосы) в формулу мутности взмыва вводится поправочный множитель β , который определен на основании данных наблюдений на Кременчугском водохранилище

$$\beta = 1 - 0,7 \frac{h}{H} \quad (17,11)$$

Пределы применимости формулы β определены как $0,2 < \frac{h}{H} \leq 0,7$. При $\frac{h}{H} > 0,7$, что отвечает условию разрушения волн, β можно считать величиной постоянной и равной примерно 0,5. Нижний предел применимости формулы $\frac{h}{H} = 0,2$, т.к. при $H \geq 5h$ участок можно считать относительно глубоководным; при $\frac{h}{H} < 0,2$ величина $\beta \cong 1$ и расчет производится по формуле, не содержащей β .

Для расчета по рекомендуемой методике необходимы следующие данные: план участка в изобатах, элементы ветровых волн, данные о составе грунтов, значения скоростей течения на участке, для которого ведется расчет.

5. Элементы волн рассчитываются по заданным скоростям и направлениям ветра. Расчет производится по методу А.П. Браславского (изложение метода см. [9,10]). При непосредственном измерении высот волн, а также при расчете по методу Браславского получается высота волны I%-ной обеспеченности в данной системе волн ($h_{I\%}$). При вычислении мутности за расчетную принимается высота волны 10%-ной обеспеченности ($h_{10\%}$) в данной системе волнения. Переход от высоты волны I%-ной обеспеченности к 10%-ной может быть осуществлен путем умножения $h_{I\%}$ на коэффициент, равный 0,75, т.е.

$$h_{10\%} \cong 0,75 h_{I\%} \quad (17,12)$$

Коэффициент 0,75 получен по кривой обеспеченности высот волн с осредненными параметрами $C_v = 0,40$, $C_s = 0,80$ для условий установившегося волнения.

6. Данные о составе донных отложений используются как для определения эффективного диаметра, так и для гранулометрического состава взвешиваемых фракций или определения расчетной гидравлической крупности наносов. Исключение невзвешиваемых фракций из состава донных отложений осуществляется методом, изложенным в разделе УП. Не следует, однако, упускать из виду, что в рассматриваемом случае пульсационная скорость вычисляется при учете вол-

в ней [формула (17,5)]. Максимальная пульсационная скорость, как и прежде, определяется равенством

$$W_{max}^* = 3 W_H^* \quad (17,13)$$

7. Скорости течения в открытой части водохранилища при отсутствии измерений могут быть получены по формулам А.В. Караушева, применимым к случаю стационарных ветровых течений:

$$V_H = \frac{M C \tilde{l} (\Delta - 1) T}{E_{cm} \sqrt{|T|}} \quad , \text{ м/сек.}, \quad (17,14)$$

$$V_0 = \frac{M C \Delta a_1}{E_{cm}} \cdot \frac{T}{\sqrt{|T|}} \quad , \text{ м/сек.}; \quad (17,15)$$

M находится по формулам раздела УП, $\tilde{l}$ и Δ — величины, зависящие от коэффициента Шези и определяемые соотношениями

$$\tilde{l} = \frac{C}{M} - \frac{1}{3} \quad , \quad (17,16)$$

$$\Delta = 1 + \frac{M}{6C} \quad ; \quad (17,17)$$

a_1 — коэффициент, вычисляемый из равенства

$$a_1 = (1 + \tilde{l}) \left(1 - \frac{1}{\Delta} \right) - 0,5 \quad ; \quad (17,18)$$

T — параметр, посредством которого учитывается касательное напряжение на водной поверхности,

$$T = 1,32 \cdot 10^{-4} (0,0003 + 0,0010 h) W_2^2, \quad (17,19)$$

где W_2 — скорость ветра на высоте 2 м над водной поверхностью, м/сек., h — высота волны, в м.

Входящая в формулы (17,14) и (17,15) величина E_{cm} может быть определена в зависимости от C из табл. 15.

Таблица 15

Значения параметра

C	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
E_{cm}	3,6	6,6	9,6	12,3	15,3	18,1	19,8	21,2	22,6	24,0	25,2	26,2

Приведенные здесь значения E_{cm} уточнены по сравнению с помещенными в книге А.В. Караушева [10] (учтено, что $M \neq const$ при $C < 60$).

8. Скорости течения для зоны волноприбоя вычисляются по следующей формуле А.Я. Шварцман:

$$\tilde{v}_{cp} = \sqrt{\frac{gH^{4/3}h \sin 2\varphi}{(0,1 + 800 \frac{H^2}{b^2})d_s^{1/2}b}}, \text{ м/сек.} \quad (17,20)$$

Формула позволяет получить значение скорости, среднее как по глубине, так и по ширине рассматриваемой зоны. Обозначения входящих в формулу величин следующие: φ - угол подхода волн к урезу (угол между лучом волны и урезом); b - ширина зоны разрушения волн, м; h - высота волны перед разрушением, м; H - глубина на линии разрушения волн, м; d_s - эффективный диаметр донных отложений, мм; $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$.

9. Переход от вычисленной средней скорости к донной приближенно осуществляется по формуле, полученной на основании соотношений Базена,

$$\tilde{v}_H = \frac{3C - M}{3C} \cdot \tilde{v}_{cp}; \quad (17,21)$$

переход от вычисленной или измеренной поверхностной скорости к средней и донной - соответственно по следующим формулам:

$$\tilde{v}_{cp} = \frac{\tilde{v}_o}{1 + \frac{M}{6C}}, \quad (17,22)$$

$$\tilde{v}_H = \frac{6C - 2M}{6C + M} \cdot \tilde{v}_o. \quad (17,23)$$

Абсолютные величины средней, донной и поверхностной скорости предполагаются связанными теми же соотношениями.

10. При решении многих практических задач возникает необходимость в получении данных о повторяемости значений мутности. Если учесть, что ветру определенной скорости и направления соответствует свое значение мутности, а каждое частное значение ветра имеет свою повторяемость в течение года или любого другого периода, то можно получить повторяемость мутности за тот же

период. Для этого надо произвести расчет мутности по вышеназванному методу для каждого расчетного направления и скорости ветра и отнести повторяемость этого ветра к полученному значению мутности.

Литература

1. Алтунин С.Т. Заиление водохранилищ и размыв русла в нижнем бьефе. "Русловые процессы", сб. статей. Изд. АН СССР, М., 1958.
2. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек СССР. Гидрометеиздат, Л., 1962.
3. Воскресенский К.П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. Гидрометеиздат, Л., 1956.
4. Головин В.В. Карта средней годовой мутности рек Таджикистана. Доклады АН Тадж.ССР, т.1, № 3, 1958.
5. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. Гидрометеиздат, Л., 1954.
6. Гостунский А.Н. Взвешивающая способность. Изв. АН Узб. ССР, № 3, 1954.
7. Дрозд Н.И. Твердий стік річок і замулення водосховищ. Гідрологічні розрахунки для річок України. АН УРСР, Київ, 1962.
8. Егiazаров И.В. Сопоставление методов расчета расхода наносов с измерениями в натуре. "Методы изучения и использования водных ресурсов". Изд. Наука, М., 1964.
9. Караушев А.В. Гидравлика рек и водохранилищ (в задачах). Изд. Речной транспорт., Л., 1955.
10. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометесиздат, Л., 1960.
11. Караушев А.В. Метод расчета осаждеия наносов в водохранилищах. Труды ГГИ, вып. 124, 1965.
12. Кондратьев Н.Е. Расчет береговых переформирований на водохранилищах. Практическое пособие. Гидрометеиздат, Л., 1960.
13. Кузнецова Р.Ф. Мутность рек Киргизии. Сборник работ Фрунзенской ГМО, вып. 1, Фрунзе, 1964.
14. Куликов Г.И. Эрозионная деятельность рек на примере Большого и Малого Кавказа Азербайджана. Ученые записки Пермского гос.ун-та, т.ХХI, вып. 3, 1962.

15. Лапшенков В.С. Некоторые результаты обработки данных по заилению и занесению подпертых бьефов гидроузлов, построенных на реках Узбекистана. "Вопросы гидротехники". Изд. АН Узб. ССР, вып. 2. 1961.
16. Лапшенков В.С. Расчет заиления водохранилищ при постоянном уровне и квазиламинарном режиме течения. Изв. АН Узб.ССР, сер.техн.наук, № 2, 1965.
17. Лисицына К.Н. Формирование стока наносов водотоков и заиление прудов на территории Северного Казахстана. Труды ГГИ, вып. 86, 1960.
18. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР. Географгиз, Л., 1952.
19. Ресурсы поверхностных вод районов освоения целинных и залежных земель. Гидрометеиздат, Л., 1958-1960.
20. Россинский К.И. и Кузьмин И.А. Балансовый метод расчета деформаций дна потока. Труды Гидропроекта, сб. 12. Изд. Энергия, М.,-Л., 1964.
21. Светицкий В.П. Средний сток взвешенных наносов рек бассейна Аму-Дарьи. Вопросы гидротехники, вып. 10. АН Узб. ССР, 1962.
22. Хмаладзе Г.Н. Взвешенные наносы рек Армянской ССР. Гидрометеиздат, Л., 1964.
23. Чертоусов М.Д. Гидравлика (специальный курс). Госэнергоиздат, М.-Л., 1957.
24. Шамов Г.И. Речные наносы. Гидрометеиздат, Л., 1959.
25. Шнеер И.А. Осаждение наносов и грунтов. Научные труды Ташкентского гос.ун-та, вып. 237, Гидрология. Ташкент, 1964.
26. Шварцман А.Я. Исследование и расчет мутности в прибрежной зоне водохранилища. Труды ГГИ, вып. 124, 1965.
27. Brune G.M. Trap efficiency of reservoirs.- Trans. Amer. Geophys. Union, v.34, № 3, 1953.

Замеченные опечатки
к Практическим рекомендациям по расчету
заиления водохранилищ

№ п/п	Строка	Напечатано	Должно быть
1	5 и 6-я св.	среднегодовой	годовой
2	9-я снизу	вверх	вниз
3	10-я сверху	$E = \frac{S_{\text{нав},0} - S_{\text{кон},0}}{S_{\text{нав},0}}$	$E' = \frac{P_{\text{а.ред.1}}}{P_{\text{ред}}} = \frac{S_{\text{нав},0} - S_{\text{кон},0}}{S_{\text{нав},0}}$
4	14-я сверху	крупности.	крупности взвешиваемых фракций.