

ВОПРОСЫ ГИДРОТЕХНИКИ

ВЫПУСК

2

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ И ГИДРОТЕХНИКИ

ВОПРОСЫ ГИДРОТЕХНИКИ

ВЫПУСК 2

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР

ТАШКЕНТ—1961

В публикуемых статьях приводятся некоторые результаты гидравлических исследований по размыву нижних бьефов гидроузлов, заилению водохранилищ и оросительных каналов, а также по возведению земляных сооружений.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников гидротехнической специальности, а также аспирантов и студентов.

Редакционная коллегия

Член-корр. АН УзССР Р. А. АЛИМОВ (отв. редактор),
член-корр. АН УзССР [С. Т. АЛТУНИН], С. Х. АБАЛЬЯНЦ,
С. Г. ЗАПРОМЕТОВ, А. М. МУХАМЕДОВ, П. В. ДОНСКОЙ,
Э. М. ПИЛОСОВ.

ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ НА РЕКАХ КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

В октябре 1956 г. в Пекине состоялась научно-техническая конференция по водохозяйственному строительству в Китайской Народной Республике, созванная Главным управлением экономических связей с заграницей и Министерством водного хозяйства КНР. Было заслушано 24 доклада по водохозяйственному строительству в Китае, Вьетнаме и Советском Союзе. К рассматриваемой проблеме относились следующие: „Заиление водохранилищ и размыв русла в нижнем бьефе плотины на большой длине“, „Полевые наблюдения за динамикой заиления Гуаньтинского водохранилища“, „Полевые исследования транспортирующей способности потока в каналах Инхуанской системы“, „Схемы головных водозаборов ирригационных систем Средней Азии“.

В первом и четвертом докладах, сделанных советскими специалистами, сообщались результаты исследований, проведенных Академией наук УзССР, обобщались передовой практический опыт, накопленный по этим вопросам в СССР, а также изученные закономерности русловых процессов под воздействием гидротехнических сооружений.

В первом докладе была предложена новая методика расчета, подтвержденная обширными данными натурных наблюдений. В четвертом предлагались схемы сооружений и мероприятия, позволяющие забрать из реки в каналы нужное количество воды без донных наносов. Рекомендации были проверены не только в лаборатории, но подтверждались также данными полевых исследований в эксплуатационных условиях¹.

Участники конференции пришли к выводу, что для рек, формирование стока которых происходит на лессовых плато и несущих поэтому большое количество наносов, должны быть разработаны особые методы расчета, компоновки и проектирования водозаборных гидроузлов и их эксплуатации.

Река Хуанхэ и ее притоки в средней части протекают по лессовому плато. Среднегодовое количество наносов достигает 35 кг/м^3 , максимальная мутность на притоках — $100\text{—}200 \text{ кг/м}^3$. Такое большое содержание лессовых наносов вызывает серьезные затруднения при эксплуатации.

¹ Алтунин С. Т. Заиление водохранилищ и размыв русла в нижнем бьефе плотин на большой длине, Сборник докладов секции водохозяйственных проблем, М., АН СССР, 1958.

В прениях по этому вопросу выступил председатель секции гидротехники при АН КНР проф. Цянь Нин, который указал, что нельзя пренебрегать влиянием воздействия взвешенных наносов на структуру потока, что такие упрощения непригодны для условий р. Хуанхэ. Так, во время лабораторных опытов, проведенных в Научно-исследовательском институте при комитете Хуанхэ, в гидравлическом лотке наблюдалось заиливание при малой мутности, а при большой мутности он не заилился.

Ссылаясь на практику США (данные заиливания 30 малых водохранилищ на Миссури), проф. Цянь Нин рекомендовал расчет заиливания водохранилищ в лессовых районах производить по формуле

$$\rho = \frac{100}{817,9} \omega^{0,7664} T^{0,7867} E^{1,0545} \left(\frac{G}{\omega} \right)^{0,3701},$$

где ρ — суммарное количество наносов, отложенных в водохранилище, m ;

ω — площадь водосбора, квадратные мили;

T — время, годы;

E — коэффициент эрозии данного района, определенный по данным наблюдений;

G — объем водохранилища, или

$$S = C \omega^{3,14} T^{2/3} \left(\frac{G}{\omega} \right)^{1/3},$$

где C — константа.

ИССЛЕДОВАНИЯ В НАНКИНСКОМ И ПЕКИНСКОМ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТАХ ГИДРОТЕХНИКИ

Нанкинский научно-исследовательский институт гидротехники располагает двумя насосными станциями и водонапорными башнями, способными подать в лаборатории воды $1,2 \text{ м}^3/\text{сек}$, что достаточно для работы 30 моделей. В институте работают три отдела:

1) отдел гидротехники, исследующий шлюзы, водопуски, сбросы, фильтрацию, транспортирующую способность потока, гашение энергии и схемы гидроузлов;

2) кабинет геотехники, исследующий устойчивость и осадку земляных сооружений, фундаментов заводов и фабрик, коэффициент трения между грунтом и бетоном, уплотнение грунтов;

3) кабинет речных потоков, изучающий устойчивость откосов берегов и дамб от волн, роль донных волноломов, гасящих энергию волн, роль плавучих предметов в размыве дамб, возникновение поперечной циркуляции в реках при приливах, моделирование русел в связи с дноуглублением.

Пекинский институт разрабатывает почти те же темы, что и Нанкинский. В нем была устроена воздушная модель водохранилища Саньмынься, строящегося на р. Хуанхэ. Кроме Нанкинского и Пекинского научно-исследовательских институтов гидротехники, в КНР существуют еще крупные институты в Ханькоу, Бойпу и других департаментах, расположенных близ речных бассейнов.

Полевые исследования проводятся не научно-исследовательскими институтами, а специальными экспедициями, которые подчиняются водным департаментам Министерства водного хозяйства КНР.

В качестве наносов на некоторых моделях применяется каменный уголь с крупностью фракций до 3 мм, на других моделях — илистые наносы (мелкие пески), привезенные непосредственно из водохранилищ и русел рек. Ряд исследований выполняется на жестких моделях с неразмываемым руслом.

Размеры моделей достаточно велики. Так, модель русла р. Янцзы у Нанкина выполнена по нелинейной зависимости в масштабе: горизонтальный — $d_h = 800$ и вертикальный — $d_v = 125$. Расход воды на модели — до 100 л/сек. Моделирование масштаба времени произведено по объему русловой деформации

$$t = \frac{d_v^2 \cdot d_h}{W},$$

где W — объем русловой деформации на участке моделирования.

Чтобы не нарушить русловой процесс при пуске и остановке опыта, модель часто работает круглосуточно. Так же как и у нас, у китайских гидротехников возникают большие трудности в воспроизведении динамики заиления водохранилищ, так как пока еще ни мы, ни они не научились моделировать количество и качество применяемых наносов, особенно глинистых и илистых частиц. Воспроизвести процесс заиления водохранилища по времени невозможно: это приведет к очень большой длительности опыта (сроки заиления больших водохранилищ исчисляются десятками и сотнями лет). Для ускорения опытов приходится ограничиваться изучением руслового процесса на небольшом участке водохранилища в конечной стадии заиления.

Для условий р. Хуанхэ у Саньмынься нами, совместно с работниками лаборатории наносов в Пекине, был принят следующий порядок исследований:

- 1) изучение транспортирующей способности потока в гидравлическом лотке длиной 50 м для бытовых условий;
- 2) исследование на воздушной модели в масштабе 1:400;
- 3) исследование на пространственной модели в два этапа: сначала одно только русло Хуанхэ, затем то же русло, включая приток и участок от места соединения рек до плотины. Но в этом случае возникает трудность: р. Хуанхэ несет очень много наносов, а притоки — мало, поэтому заиление в зоне притока будет происходить очень медленно.

В месте соединения рек образуется бар, а на притоке — неиспользованная емкость водохранилища. В связи с этим необходимо было изучить специальные устройства по сбросу наносов (у места соединения двух рек) через тоннель в обход плотины или устройство донных сбросов в теле плотины (рис. 1). В тот период еще не было выяснено, на какой высоте следует располагать эти сбросные устройства, каких размеров нужны донные сбросы с учетом периодического промыва отложений.

Сочли возможным принять следующие масштабы модели р. Хуанхэ (для расхода натуре 20 000 м³/сек) $d_h = 500$ и $d_v = 60$, что дает на модели $q = 125$ л/сек, $V = 25$ см/сек. При этих условиях обеспечивается требуемое число Рейнольдса.

Заменителем наносов был уголь с объемным весом $\gamma = 1,4 - 1,5$; в качестве заменителя взвешенных наносов для опытов в гидравлическом лотке (вместо глины и лесса) подыскивался порошок (слюды или другой пыли), не уплотняющийся при осаждении на дно водо-

хранилища. Удельный вес взвешенных частиц должен быть близким к единице.

В лаборатории Пекинского института вместо мутной воды использовалась соленая подкрашенная вода объемным весом $\gamma = 1,01 - 1,10$, которую впускали через донные трубочки в гидравлический лоток со стоячей водой. Тяжелая вода в опытах не растекалась, она проходи-

ла у дна определенным слоем (4,5—6,0 см). Общая глубина стоячей воды в модели была 40 см, длина лотка 14 м, его ширина — 0,50 м, уклон дна — 0,01, скорость движения соленой воды — 0,05 м/сек, расход соленой воды — 1 л/сек.

В лаборатории испытывалась воздушная модель водохранилища Саньмынься. Срок заиления мертвого объема водохранилища определен в 50 лет, длина кривой подпора — 220—240 км.

Трудности таких опытов заключаются в следующем:

а) нет более или менее разработанной методики по моделированию динамики заиления, а также количества и качества пускаемых в модель наносов;

б) водохранилище расположено на двух притоках с резкой разницей в их мутности;

в) мало данных о динамике заиления во-

дохранилищ с обильным содержанием наносов в реке (при мутности более 100 кг/м^3).

После этих исследований (в лотке и на воздушной модели) была построена пространственная модель, в которой применялись натуральные наносы, взятые из подпертого бьефа Гуаньтинского водохранилища. В 1957 г. проводились лабораторные исследования модели по регулированию русел при водозаборе на р. Хуанхэ.

В связи с этим был заслушан доклад представителя комитета Хуанхэ начальника лаборатории в Ханькоу инж. У И-си „О русловых процессах в нижнем течении Хуанхэ“. На этом участке, кроме регулирования русел при водозаборе, давно проводятся обвалование и крепление берега от размыва. Смещение берега в течение года в ту

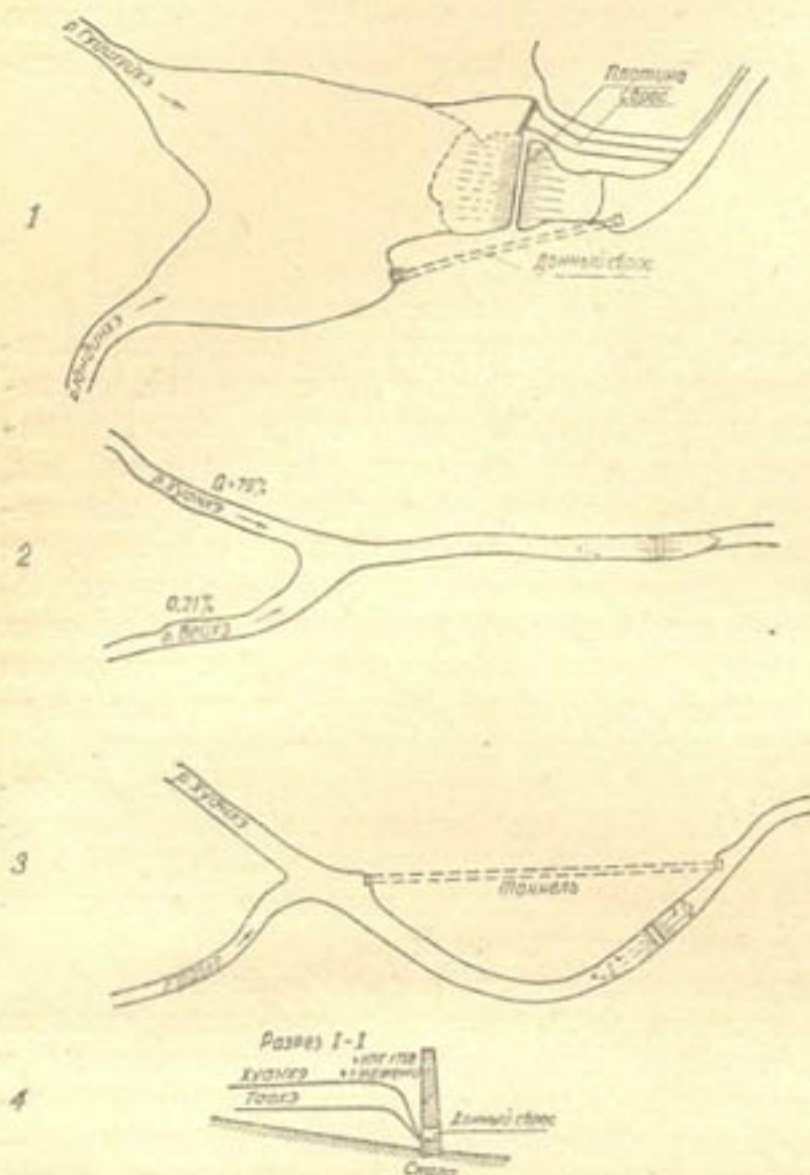


Рис. 1. Схемы компоновки водохранилищных плотин: 1 — Гуаньтинское водохранилище; 2 — Саньмынься (проект); 3 — Люцзяся (проект); 4 — схема отложения наносов в месте соединения протоков разной мутности.

или другую сторону достигает 2 км. Русло сложено из наносов $d \leq 0,06$ мм; уклон — 0,00013; длина блуждающего участка — 275 км.

На семинаре в институте было заслушано сообщение инж. Шин о расчете заиления водохранилища на р. Хуанхэ в створе Люцзяся, чаша которого распространяется также на приток Таохэ. Полный объем водохранилища 5 км³, полезный объем — 3 км³, установленная мощность — 1 млн. квт, годовой сток наносов — 91 млн. т.

Средний расход воды Таохэ 160 м³/сек. Сток наносов из притока Таохэ составляет четверть общего количества стока Хуанхэ, а сток воды — одну пятую.

Из 5 км³ общего объема водохранилища Таохэ составляет 1 км³. Срок заиления 100 лет. Ввиду малой мутности Таохэ ожидается неравномерное заиление водохранилища.

После изучения заиления притока возникло два вопроса: 1) будут ли крупные наносы поступать к турбинам в ГЭС; 2) будут ли гряды наносов из протока тормозить формирование русла. Часть полезной емкости в этом случае (в определенный период) пропадает, так как на входе образуется гряда.

Расчет предполагает, что все мелкие наносы пройдут через плотину, не задерживаясь в водохранилище. Но если они не пройдут, то срок заиления будет значительно короче.

Для борьбы с заилением водохранилищ были предложены следующие мероприятия:

1) борьба с эрозией почв в бассейнах (это требует много времени и неэффективно);

2) постройка второго водохранилища (на притоке) с высотой плотины 80 м, объемом 3,2 км³, ежегодным стоком наносов 0,023 км³, сроком заиления более 100 лет, мощностью ГЭС 1 млн. квт;

3) периодический промыв бьефа через тоннель со сбросом 10—16% воды в обход плотины.

В результате обсуждения в Пекинском институте, на семинаре, проведенном в период конференции, было выяснено, что строить тоннель для сброса наносов ненадежно, так как при большой глубине будут малые скорости и малая зона всасывания наносов; лучше устраивать донные сбросы в теле плотины (а не тоннель).

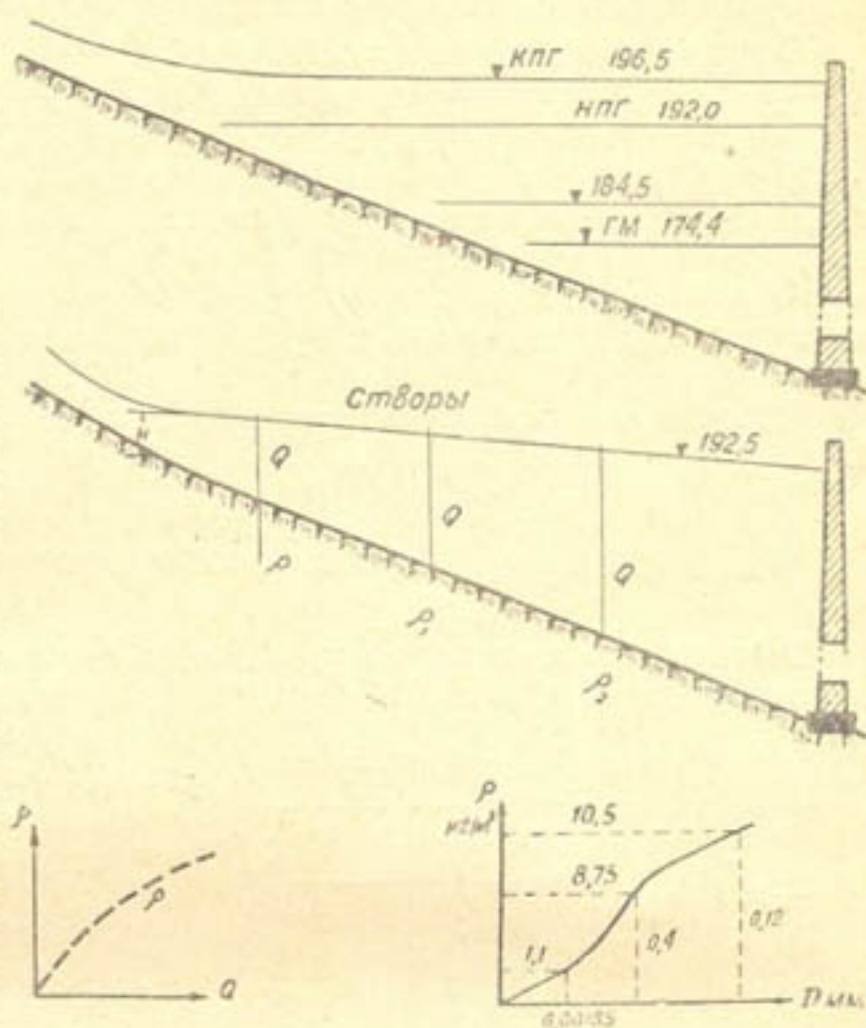


Рис. 2. Схема к расчету заиления водохранилища на р. Фураха.

Затем на семинаре был решен пример расчета заиления водохранилища на р. Фураха в створе Синянка по предложенной нами методике (рис. 2).

Данные к расчету: $H = 40$ м; $L = 583$ км;
 $F = 27\,300$ км²; $W_0 = 936 \cdot 10^6$ м³; $h_{\text{под}} = 21$ км.

Годовой сток воды: $Q = 1,56 \cdot 10^9$ м³; $Q_{\text{тах}} = 1780$ м³/сек; $Q_{1\%} = 8680$ м³/сек.

Среднегогодовой сток наносов: $S_t = 14,6 \cdot 10^6$ т.

Состав наносов (при $\rho = 9,35$ кг/м³):

$d_{15\%}$	$d_{50\%}$	$d_{25\%}$
0,03 мм	0,015 мм	0,003 мм.

В расчетах заиления учтена мутность за период паводка, т. е. за три месяца — июль, август и сентябрь в течение которого проходит 90% стока наносов.

Самые мелкие наносы (около 10%) из расчета были изъяты, так как предполагается, что они будут уноситься в нижний бьеф в придонном слое.

Проектировщики вели расчеты по методам С. Т. Алтунина, И. И. Леви и Г. И. Шамова.

О ПЛОТНОМ ПОТОКЕ

В водохранилищах, построенных на реках, сильно насыщенных взвешенными наносами, наблюдается движение в придонных слоях

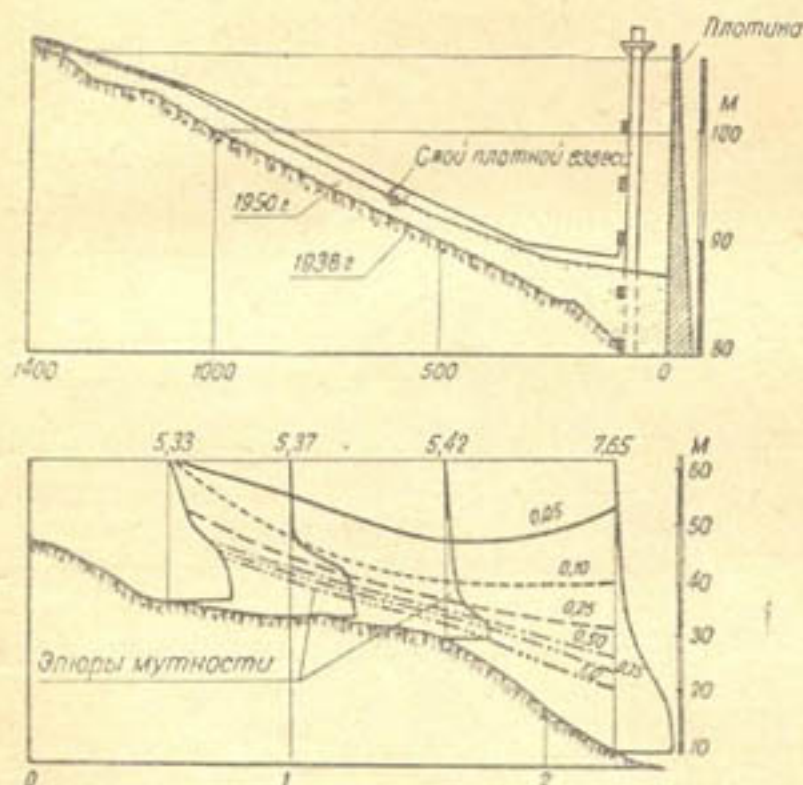


Рис. 3. Протекание потока, насыщенного взвешенными наносами.

потока тяжелой взвеси, образованной водой и мельчайшими твердыми частицами.

В этой области проведены лабораторные опыты в Китае, Югославии, США и Алжире; была установлена возможность транзита этого потока через донные выпуски, что полезно, так как это удлиняет срок заиления водохранилища.

Наблюдениями установлено, что при создании достаточно большого напора у дна образуется устойчивый поток тяжелой взвеси с ясно выраженной устойчивой границей раздела (рис. 3). Взвешенные наносы в этом потоке состоят из очень мелких частиц

$d < 0,02$ мм и содержат большой процент коллоидных частиц. Такой поток можно считать особой плотной жидкостью, достаточно однородной по всей своей толще, с удельным весом, превышающим единицу. Он переносит через водохранилище значительную долю всех

мельчайших взвешенных наносов, удлиняя, как указывалось выше, срок службы водохранилища.

Концентрация тяжелой взвеси по длине потока постепенно увеличивается, толщина плотного слоя несколько уменьшается с увеличением его удельного веса и уклона дна водохранилища. Мельчайшие частицы, оседая, коагулируются. Отложения имеют удельный вес $\gamma = 1,4 \text{ т/м}^3$ (при $d = 0,001 \text{ мм}$).

Для воспроизведения донного потока в лабораториях вместо воды применяли газولين, керосин, хлор, одновременно вводя на дно водохранилища мелкие илистые частицы. Можно употреблять и обычную воду, но тогда вместо плотной жидкости нужно брать соляной раствор объемным весом 1,1—1,15. Плотный поток взвеси не смешивается с верхним слоем воды¹.

ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В ГУАНЬТИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (1953—1955 гг.)²

Первое крупное водохранилище, построенное после освобождения Китая для борьбы с наводнениями, получения электроэнергии, развития орошения и водоснабжения Пекина — Гуаньтинское. Река приносит большое количество наносов и поэтому наблюдения за динамикой его заиления имеют большое значение (рис. 4).

В 1953—1955 гг. много раз наблюдалось течение через водохранилище донного потока тяжелой взвеси.

Площадь бассейна р. Юндинхэ около $48\,500 \text{ км}^2$, из них вверх от створа Гуаньтин — около 97%. Площадь бассейна покрыта лесовым грунтом; сток реки образуется главным образом от ливней, когда происходит сильный смыл поверхности земли. Среднегодовой расход воды в реке в створе Гуаньтин составляет $43,2 \text{ м}^3/\text{сек}$. Объем годового стока воды — 1,36 млрд. м^3 , объем годового стока наносов — 70 млн. т . Среднемесячные расходы воды колеблются от 2,8 (в межень) до $580 \text{ м}^3/\text{сек}$ в паводок. В паводковый период в июле, августе и сентябре каждого года в воде содержится большое количество наносов и проносится до 90% объема всего их годового стока.

Во время паводка крупность наносов (d_{50}) в р. Юндинхэ колеблется приблизительно от 0,007 до 0,025 мм. Расчетный паводковый расход 0,1% обеспеченности равен $8800 \text{ м}^3/\text{сек}$. Объем водохранилища достигает 2,27 млрд. м^3 . Объем задержанного паводка при этом составит 1,07 млрд. м^3 , заиление — 900 млн. м^3 . Наполнение водохранилища началось с августа 1955 г. В конце этого же года начала работать гидроэлектростанция. Главные сооружения водохранилища Гуаньтин — плотина, водопускной тоннель с башней и водосброс. Расход воды на ГЭС составляет: минимальный — $17 \text{ м}^3/\text{сек}$, максимальный — $111 \text{ м}^3/\text{сек}$. Уклон реки — 0,002, кривая подпора — 30 км. Плотина устроена из местного грунта с облицовкой откоса каменной отмошкой.

В водоприемной башне помещено восемь высоконапорных затворов (размером $1,75 \cdot 1,75 \text{ м}$), расположенных в два яруса. Поднимаются и опускаются они при помощи масляных подъемников. Пропускная способность тоннеля — $560 \text{ м}^3/\text{сек}$; максимальный сбросной расход — $560 \text{ м}^3/\text{сек}$.

¹ По вопросу о расчете донных потоков см. статью И. И. Леви „Теория донных течений в водохранилищах“, Изв. ВНИИГ*, т. 62, 1959.

² По данным доклада инж. Лун Ю-цина на научно-технической конференции в октябре 1956 г.

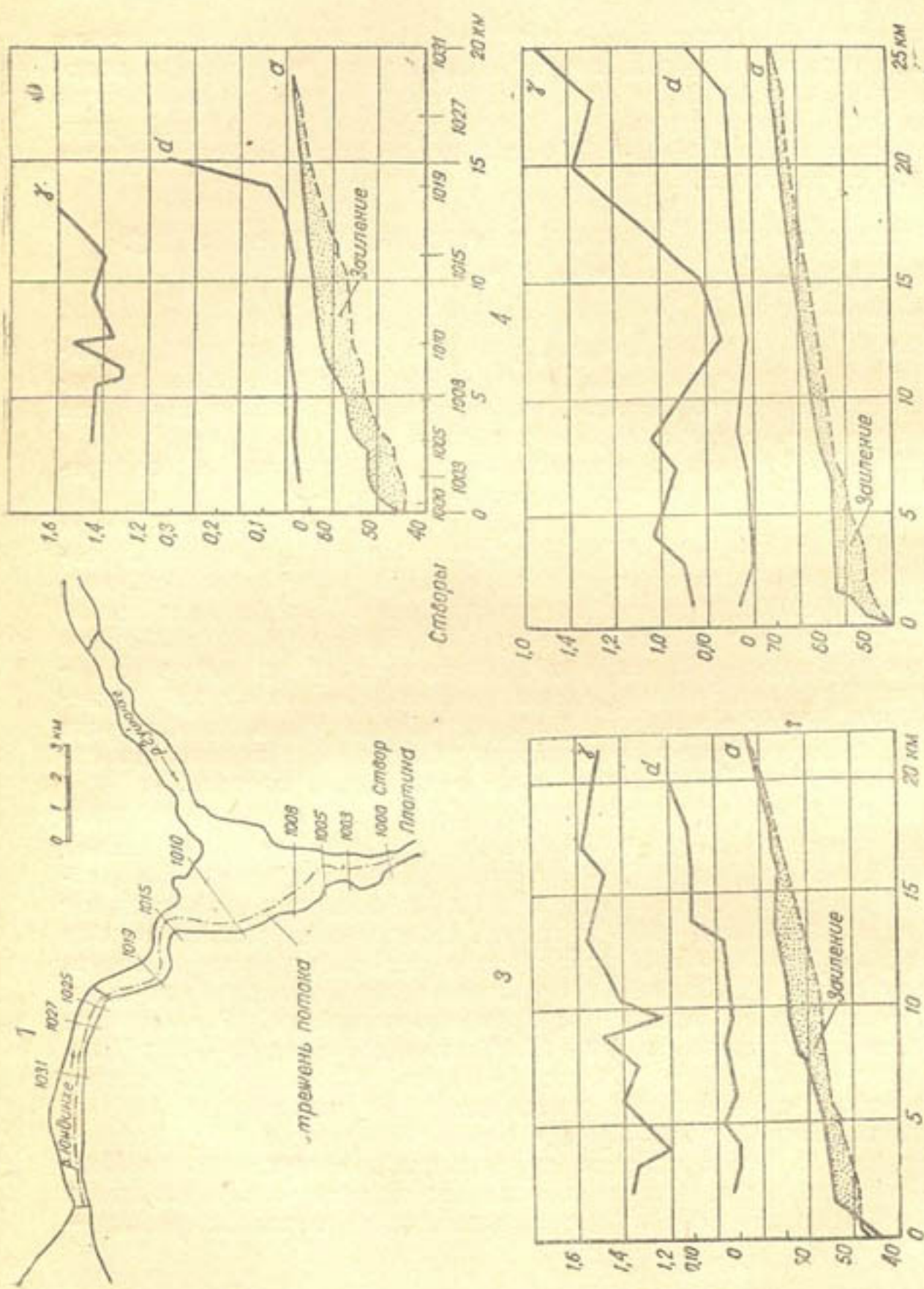


Рис. 4. План Гуаньтинского водохранилища (1). Отложения наносов:
 2 — 1953 г.; 3 — 1951 г.; 4 — 1955 г.
 а — отложения после паводка, м; d — изменение средней крупности отложений, мм; γ — изменение объема веса отложений по длине.

Шесть полевых отрядов изучали мутность и скорость потока по длине и ширине водохранилища. Пик паводка продолжается 8—10 часов. За это время наблюдатели успевали взять пробу мутности и измерить скорости воды, используя два катера и шесть лодок.

В 1956 г. уровень подпертого бьефа колебался в пределах 5 м. Для промеров русла створы в пределах водохранилища расположены через 500 м (по длине водохранилища закреплено 46 створов). В дальнейшем намечается сократить их число до 15. Для промера глубин применяется эхолот, который при глубине более 2 м дает достаточно точные данные: одну линию дна предшествующего года, т. е. уплотненное дно и вторую — свежие отложения. У работников экспедиции имеются некоторые сомнения в правильности этих показаний.

В связи с этим дно водохранилища (отложения) определяется по следующим признакам: 1) скорость течения—0,1 м/сек; 2) мутность воды у дна внезапно увеличивается.

Скорость течения в водохранилище измеряется вертушкой с точностью 0,1 м/сек (скорости менее 0,1 м/сек, следовательно, не измеряются).

Наиболее резкая разница в мутности у дна замечена при $Q < 200 \text{ м}^3/\text{сек}$. Наибольший расход, при котором проявляется максимум мутности с крупностью частиц $d = 0,002—0,015 \text{ мм}$, равен $400 \text{ м}^3/\text{сек}$. Изменения рельефа дна и сечений Гуаньтинского водохранилища показаны на рис. 5.

В 1954—1955 гг. на шести створах одновременно измерялись скорости и брались пробы наносов. В 1956 г. основное внимание уделялось изучению движения донного потока. Взятые пробы мутности использовались для определения гранулометрического состава наносов. Наблюдались также испарение воды и переработка берегов. Все эти работы выполнялись гидрогеологической экспедицией.

По данным экспедиции, во время заполнения водохранилища паводком в 1955 г., когда донные затворы находились в открытом состоянии, а уровень воды в водохранилище был близок к проектному, 25% поступающего в водохранилище количества наносов сбрасывалось в нижний бьеф плотины. При более низких отметках горизонта воды сброс наносов достигал 51 и 56% от поступающего количества. Главной причиной сброса наносов является то, что при высоком уровне воды в водохранилище образовался поток тяжелой взвеси донного типа. Во время опорожнения размыв достигает 40 тыс. т. За семь опорожнений в период 1953—1954 гг. (опорожняющий расход достигал $140 \text{ м}^3/\text{сек}$), средняя мутность достигала 200 кг/м^3 . В составе наносов было около 25% глины, около 20% песчаного грунта, остальное составлял пылеватый грунт крупностью 0,005—0,06 мм.

В период паводка из-за большого количества наносов мутность речной воды оказалась больше, чем в водохранилище. Поэтому речная вода с мелкими наносами проходила вниз и двигалась по дну водохранилища до самой плотины. Подобные донные потоки наблюдались много раз (в 1953 г.—один раз, в 1954 г.—десять, в 1955 г.—три, в 1956 г.—восемь раз).

В табл. 1 приведены данные о прохождении потока придонной взвеси за период 1953—1955 гг. С возникновением плотного потока донного типа мутность и твердый расход при входе и выходе из водохранилища соответственно изменяются. Это позволяет заранее приблизительно определить возникновение и время распределения твердого потока тяжелой взвеси и использовать его для пропуска наносов из водохранилища.

Ежегодные гидрологические и топографические измерения недостаточно точны. Так, например, ряд лет пробы наносов брались только с поверхности заиления, их удельный вес определялся в сухом состоянии и не учитывалось уплотнение заиленных наносов. В твердом расходе, поступающем в водохранилище, не были учтены донные наносы.

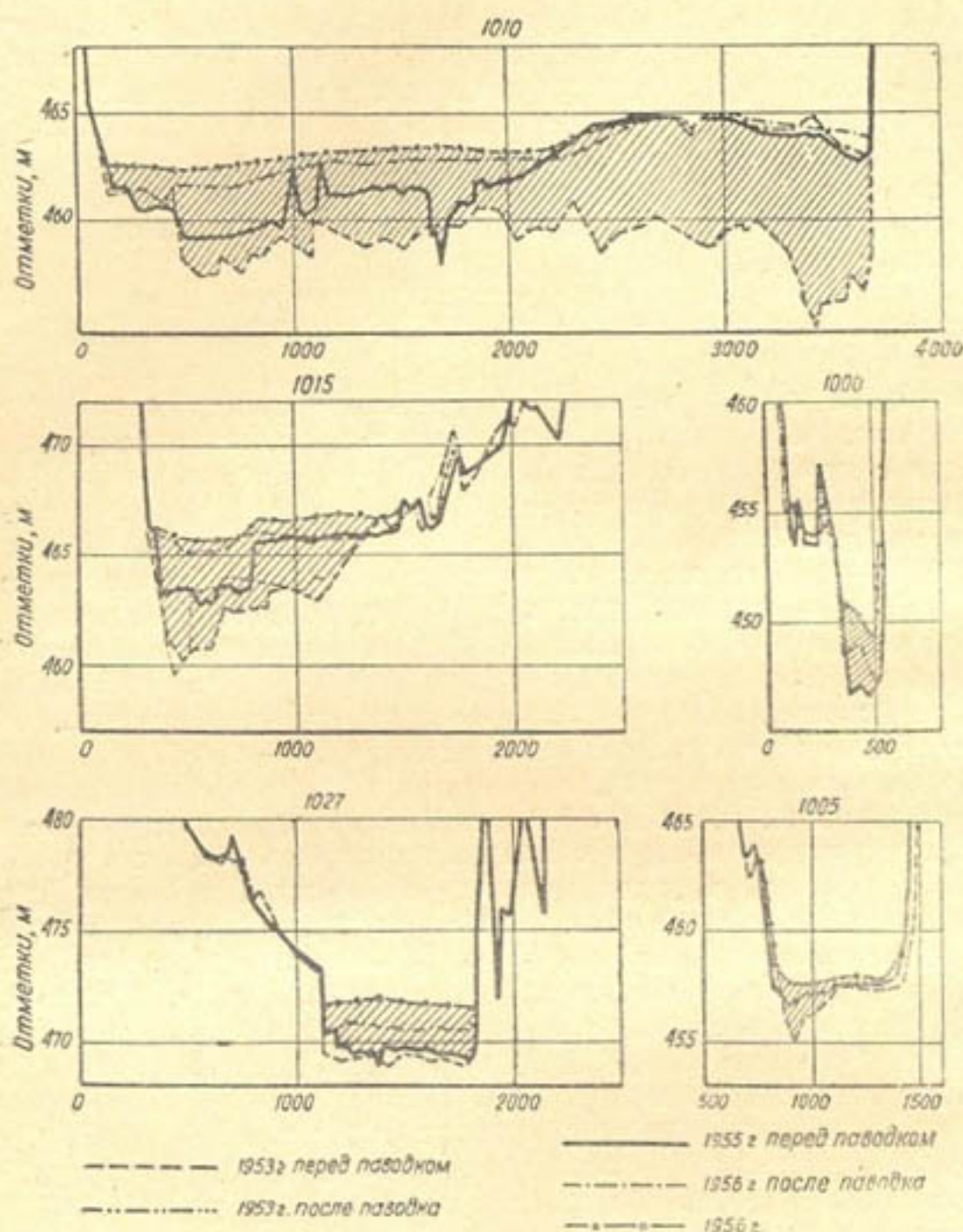


Рис. 5. Изменение поперечного сечения водохранилища Гуаньтин.

В результате заиления дно водохранилища стремилось стать горизонтальным, т. е. в первую очередь заилилась глубокая часть водохранилища. Придонный слой тяжелой взвеси захватил большую ширину и продвинулся до плотины. Но та часть, которая еще не успела крепко уплотниться, можно сбрасывать, пропуская воду через отверстия плотины. В табл. 2 приводятся данные гидравлических элементов, по наблюдениям 1956 г.

Плотный придонный поток имеет среднюю скорость 0,2—0,63 м/сек, среднюю мутность — 30—75 кг/м³, толщину—0,6—3 м. Более подроб-

но данные гидравлических параметров придонного потока тяжелой смеси по главному течению помещены в табл. 3.

Установлено, что тяжелая взвесь течет по глубоким местам. Наблюдается также ясная граница, вблизи которой мутность потока и температура воды значительно изменяются даже в слое на 0,1 м. Движение донной взвеси у плотины тесно связано с открытием затворов. Если отверстие донного сброса открыто, то наносы, транспортируемые придонным потоком до плотины, будут поступать в нижний бьеф. При встрече заграждения поступающий тяжелый поток взвеси поднимается вверх и скорость его движения уменьшается.

Таблица 1

Крупность (<i>d</i>), мм	Состав наносов с диаметром частиц меньше данного, %	
	вход в водохранилище	выход из водохранилища
0,005	35	60
0,01	48	75
0,03	72	92
0,06	88	98
0,15	100	100

Крупность твердого придонного потока тяжелой взвеси мала и равномерна, она составляет 0,008—0,015 мм. Поступающие в водохранилище крупные наносы осаждаются в верхнем течении или в конце кривой подпора. Крупность наносов, поступающих в водохранилище,

Таблица 2

Дата	Промежуток времени, часы	Средний уровень водохранилища, м	Средний твердый расход, выходящий из водохранилища, т/сек	Средняя крупность наносов, входящих в водохранилище, мм	Средняя крупность наносов, выходящих из водохранилища, мм	Положение движения донного потока тяжелой смеси в водохранилище		
						средняя скорость, м/сек	средняя мутность, кг/м ³	толщина слоя, м
—	120	61,4	45,4	0,007	0,032	—	—	—
2. VII	72	56,4	11,3	0,0052	0,011	0,33—0,35	36—74	1,45—1,93
21. VII	104	58,7	10,3	0,0042	0,017	0,19—0,24	20—26	0,85—1,05
—	48	59,5	6,6	0,0052	0,010	—	—	—
30. VII	64	58,7	14,5	0,0042	0,013	0,30—0,36	87—133	1,85—2,55
—	52	59,3	7,6	0,0040	0,015	—	—	—
—	96	60,8	3,1	0,0037	0,013	—	—	—
16. VIII	60	62,9	4,3	0,0028	0,020	0,23—0,32	20—33	1,23—2,08
19. VIII	108	64,4	2,2	0,0026	0,009	0,18—0,25	85—131	1,0—1,3
25. VIII	72	65,8	4,4	0,0035	0,007	0,12—0,50	85—150	1,1—1,9
5. IX	120	65,6	11,8	0,0031	0,011	0,25—0,40	65—133	1,3—2,2
12. XII	—	54*	—	—	—	0,21—0,29	33—40	2,1—4,4
8. XII	—	61	0	—	—	0,25—0,45	65—77	2,1—3,4
—	—	63	0	—	—	—	—	—

* Сильное изменение уровня.

зависит от расстояния — чем ближе к плотине, тем они мельче. От этого зависит и устойчивость потока тяжелой взвеси. Ближе к плотине крупность наносов становится более мелкой и равномерной, она легко коагулируется, а гидравлическая крупность зерен после коагуляции изменяется.

Из анализа распределения мутности перед плотинной видно, что в начальном периоде скорость осаждения наносов равна 0,003—0,004 см/сек. При концентрации наносов, составляющей 200 кг/м³ и

выше, скорость осаждения меньше и они длительное время сохраняются во взвешенном состоянии.

Таблица 3

Дата (1956 г.)	Измеренное сечение	Отметка воды водохранилища, м	Глубина воды, м	Толщина твердого потока, м	Средняя скорость по линии измерения, м/сек	Средняя мутность по линии измерения, кг/м ³	Уклон дна водохранилища, %	Уклон поверхности воды водохранилища, %
19.VI	1027	74,98	3,85	1,16	0,40	55,00	1,01	1,02
	1019		7,50	1,00	0,32	115,0	0,72	0,70
	1010		13,20	1,20	0,47	77,0	1,42	1,42
	1008		20,20	1,05	0,47	65,0	1,11	1,13
	1000		25,50	1,35	0,25	63,0	—	—
27.VI	1019		7,63	1,00	0,33	55,0	0,94	0,97
	1008		19,80	1,40	0,38	65,0	0,63	0,69
	1003		21,70	0,95	0,47	63,0	1,90	1,82
	1000		25,20	1,50	0,60	54,6	—	—
2.VIII	1019	75,25	6,50	1,40	0,35	41,9	0,93	0,92
	1010		12,80	1,45	0,27	52,2	0,85	0,96
	1008		17,50	0,85	0,19	66,5	1,39	1,13
	1000		23,60	2,00	0,63	53,1	—	—

Примечания. 1. Толщина придонного потока тяжелой смеси исчисляется с мутности $\rho < 10 \text{ кг/м}^3$.
 2. Средняя скорость и средняя мутность показывают средние величины в толщине потока.
 3. Уклон поверхности воды представляет собой падение при линии мутности $\rho < 10 \text{ кг/м}^3$.

ВЫВОДЫ

1. Конференция положила начало широкому обмену опытом по водохозяйственному строительству в СССР, Китае и Вьетнаме, позволяющему более рационально решать важные вопросы гидротехники.

2. Особого внимания и дальнейшего изучения заслуживают вопросы о заилении водохранилищ и разработке конструкций плотин, позволяющих производить сброс плотной придонной взвеси, перемещающейся слоем толщиной 0,5—2 м. Такие слои можно сбрасывать через донные выпуски в теле плотины, что значительно удлинит срок заилиения водохранилища.

3. Для сброса плотной придонной жидкости в нижний бьеф донные выпуски следует устраивать в центральной части действующего русла рядом с холостым сбросом, чтобы включать в работу донный выпуск сразу после пропуска паводка или одновременно с ним.

4. Заиление водохранилищ, расположенных в месте соединения двух рек с разной мутностью (Гуаньтин, Саньмынься и Ламинься) создает на входе в главное русло бар, сокращая тем самым полезную емкость водохранилища. В подобных случаях требуются дополнительные мероприятия в виде перехвата наносов в обход плотины или периодическая промывка — сброс воды со снижением горизонтов подпора. Как показывает опыт наблюдений на Гуаньтине, через донный сброс можно направлять в нижний бьеф 40—50% стока наносов, вдвое удлиняя этим срок службы водохранилища.

5. Полевые исследования динамики заилиения Гуаньтинского водохранилища показывают, что подобные исследовательские работы нужно проводить в большом объеме, применяя новейшую аппаратуру.

БОРЬБА С НАВОДНЕНИЯМИ И ЗАСУХОЙ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Конференция в Пекине (октябрь 1956 г.) положила начало широкому обмену опытом по водохозяйственному строительству Китая, СССР и Демократической Республики Вьетнам. Такой обмен позволяет наметить рациональное комплексное решение сложных вопросов борьбы с наводнением, развития орошения и строительства каскада гидроэлектростанций и водохранилищ, стоящих перед народом и правительством Китайской Народной Республики. Доклады, сделанные на конференции, дали возможность ознакомиться с общим состоянием водного хозяйства КНР и мерами, проводимыми по коренному его улучшению.

Настоящая статья, написанная по материалам докладов китайских специалистов на указанной конференции, имеет целью ознакомить советского читателя с некоторыми данными о водном хозяйстве КНР и мероприятиями по борьбе с наводнениями и засухой — областью, наиболее интересовавшей автора статьи, участника конференции.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ОСОБЕННОСТИ РЕК КИТАЯ

Большая часть территории Китая находится в умеренном поясе. Осадки и температуры воздуха по сезонам и районам страны меняются в значительных пределах. Летом выпадает около 50% осадков, зимой — около 10. Разность сезонной температуры небольшая: в южных провинциях в пределах 15° и в бассейне р. Янцзы — от 20 до 25°. Безморозный период в среднем и нижнем течении р. Янцзы составляет 270—280 дней.

Важнейшие реки Китая (рис. 1) текут в восточном направлении. Всего в стране 1600 довольно больших рек. Общая длина их — 226 тыс. км. Объем годового стока — 2680 км³. Гидроэнергетические ресурсы Китая исчисляются в 540 млн. квт. Если принять коэффициент использования равным 50%, то гидроэнергетические ресурсы составят около 300 млн. квт.

Основные водные системы страны: реки Амур (Хэйлунцзян), Ляохэ, Хуанхэ, Хуайхе, Янцзы, Чжунцзян (Жемчужная), водная система Северного Китая, реки Юго-Восточного приморского района, бессточные реки Северо-Западного Китая, Тибета и Юго-Западного края страны.

Р. Хэйлунцзян (Амур) — общая река Китая и Советского Союза. Ее протяженность 4700 км, из них в пределах Китая — 3700 км. Общая водосборная площадь — 1 843 000 км², на территории Китая — 893 000 км². Среднегодовой сток равен 347 км³. Около 60% осадков выпадает летом, но благодаря большой залесенности водосборного бассейна изменение расходов по временам года небольшое.



Длина р. Ляохе 1430 км, среднегодовой сток — 16,2 км³. В июле и августе сток составляет 45—65% годового. В бассейнах притоков бывают ливни, вызывающие наводнения. Среднегодовой расход — 513 м³/сек.

В водную систему Северного Китая входит р. Юндинхе. Она отличается большой мутностью: среднегодовой твердый сток равен 82 млн. м³ и максимальная осредненная по сечению мутность — 43,6 кг/м³. На этой реке в 1953—1955 гг. построено Гуантинское водохранилище.

Протяженность р. Хуанхэ 4845 км. В верхнем и среднем течении она проходит по плато и ущелью и выходит на равнину у гор. Мэнцзинь; отсюда река обвалована дамбами вплоть до моря.

Район среднего течения представляет собой лессовое плато, которое подвергается серьезной эрозии и является основным районом формирования твердого стока реки. Площадь бассейна составляет 370 000 км²; за год с 1 км² выносятся 3 700 т почвы.

По летописи в течение прошлых трех тысяч лет произошло более 1 500 прорывов дамб и наводнений. Река двадцать шесть раз меняла свое течение, причем девять раз особенно существенно. Русло в нижнем течении реки блуждало до Хуайхэ на севере и р. Янцзы на юге.

Среднегодовой сток Хуанхэ в створе Локоу равен 55,8 млрд. м³. Распределение стока внутри года очень неравномерное, летний сток занимает около 60% годового, среднегодовой твердый сток равняется 13 800 млн. т. Максимальная среднегодовая мутность составляет 57,6 кг/м³ и среднемноголетняя — 35 кг/м³. Максимальная мутность достигает 200—300 кг/м³, максимальный расход 0,1% обеспеченности — 35 000 м³/сек. В низовьях река вскрывается сравнительно поздно, поэтому там в начале весны иногда образуются заторы льда, вызывающие наводнения. На отдельных участках реки проводятся большие защитные работы при помощи шпор из fascia и грунта, облицованного каменной кладкой (рис. 2).

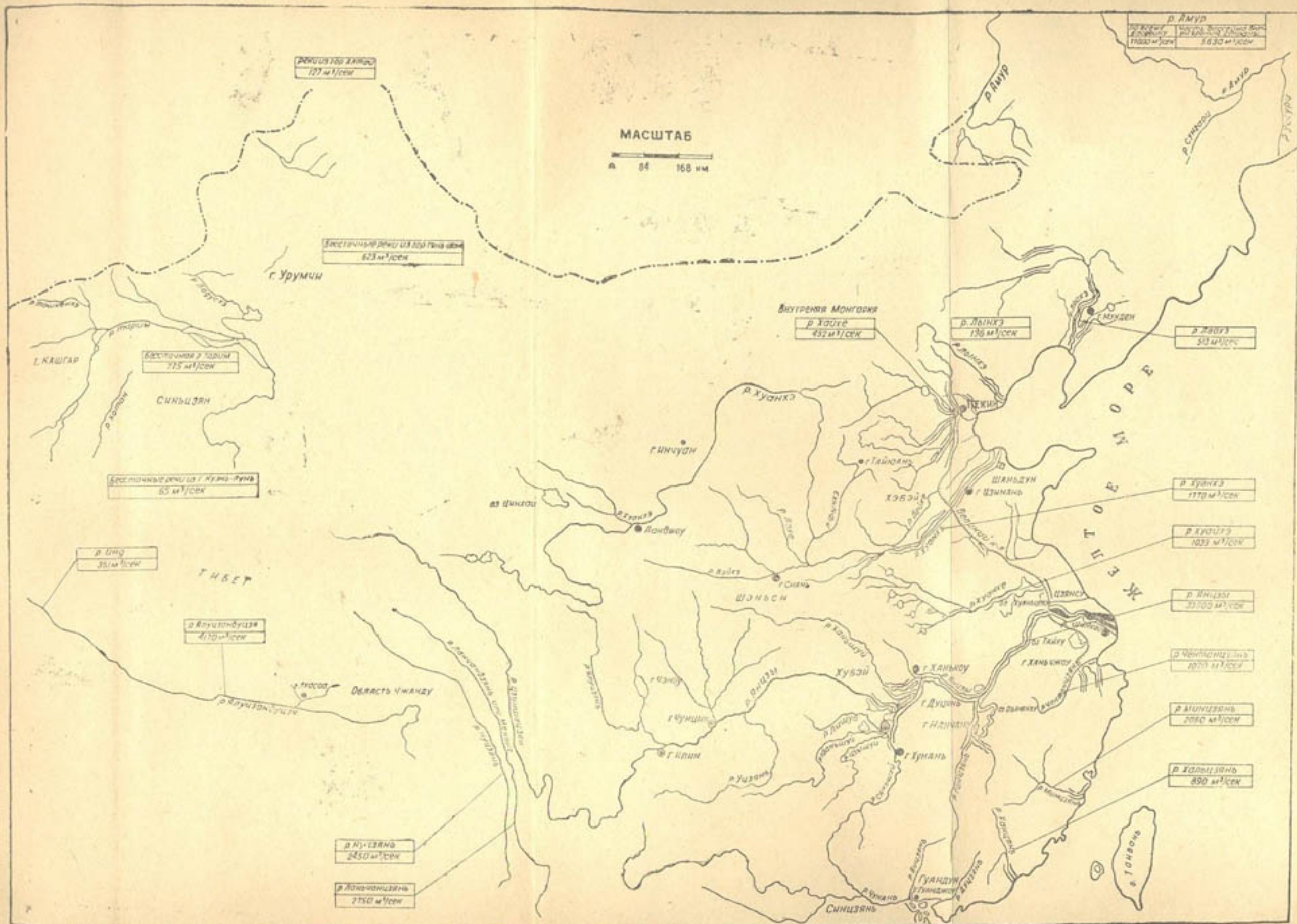
Р. Хуайхэ у Желтого моря впадает в оз. Хуаньцеху. По выходе из гор на равнину Хуайхэ и ее северные притоки текут между дамбами (рис. 3). Пропускная способность реки между дамбами недостаточна для сброса паводков, образующихся в горных районах. Наводнения и затопления местным поверхностным стоком носят серьезный характер.

Средний годовой сток Хуайхэ равняется 32,6 км³, в июле и августе проходит около 80% его. Водосборная площадь реки — 187 000 км². Нижняя часть течения Хуайхэ много раз захватывалась разливами Хуанхэ, вследствие чего русло оказалось сильно заиленным. Среднегодовая мутность не более 0,8 кг/м³, так как Хуайхэ проносит небольшое количество наносов. В течение 100 лет было 70 наводнений и 50 засух, т. е. в некоторые годы были и наводнение, и засуха.

Р. Янцзы имеет общую протяженность 5 500 км и водосборную площадь 1 939 000 км². Среднегодовой сток ее равен 1056 млрд. м³, среднегодовой расход в створе Датун, расположенном в низовьях реки, достигает 33 500 м³/сек. Максимальный расход в устье равен 90 000 м³/сек. На этом участке скорости течения небольшие.

Продольный профиль реки, план реки при впадении в море, направление русла Бонфу (притока Янцзы у Шанхая) показаны на рис. 4.

Янцзы — важная транспортная артерия средней части Китая. По реке и ее притокам водный путь больших и маленьких пароходов составляет 16 200 км, а для деревянных судов — 54 400 км.



Общая протяженность основных дамб по обоим берегам — 3160 км. Притоки в своих низовьях также обвалованы дамбами, соединяющимися с основными, протянутыми вдоль Янцзы.

Янцзы по водности пятая река мира. Сток внутри года распределяется довольно равномерно: весной — 12% общего стока, летом — 36, осенью — 39 и зимой — 13. По историческим данным, за 2096 лет (185 г. до н. э. — 1911 г.) в бассейне реки было 214 наводнений, в среднем одно наводнение в 10 лет. Засуха здесь реже, чем в бассейне Хуанхэ. Наводнения происходят не только при прорыве дамб, но и в результате ливней и длительных дождей.



Рис. 2. Крепление откоса защитной шпоры.

Р. Чжунцзян имеет водосборную площадь 448 000 км². Это самая могучая река в Южном Китае. Среднегодовой сток в устье 363 км³, т. е. по водности она уступает только р. Янцзы. Согласно летописям, в течение прошедших 2162 лет (206 г. до н. э. — 1956 г.) было 1081 сильное наводнение и столько же засух, т. е. в среднем каждый год наблюдались или засуха, или наводнение, что наносило большой ущерб народному благосостоянию.

Реки приморских районов Юго-Восточного Китая сравнительно короткие и впадают в море. Их средний годовой сток составляет 265 км³. Бессточные реки в Северо-Западном Китае текут в провинции Ганьсу и автономной области Синьцзян. Площадь бассейнов бессточных рек в провинции Ганьсу равна 180 000 км² и сток — 7,9 км³. В области Синьцзян водосборная площадь около 576 000 км², среднегодовой сток главных рек — 50 км³. В Тибетском плоскогорье реки небольшие.

Крупнейшие реки Китая приносят населению большие бедствия. Наводнения чаще всего происходят в период между июнем и сентябрем главным образом в результате ливней, причем период дождей на юго-востоке наступает раньше, чем на северо-западе. Ливни бывают очень сильные: на юго-востоке, в приморских районах, за один день иногда выпадает более 600 мм осадков. Однако вследствие больших колебаний в выпадении осадков по сезонам там бывают и засухи. Истребление лесов, недостаточное проведение водохозяйственных работ и продолжительные войны усиливали бедствия от засух и навод-

нений. Так, например, в 1928 г. в районах северо-запада и юго-запада Северного Китая стояла катастрофическая засуха, она охватила больше одной четверти страны, пострадало 120 млн. человек. Урожайность уменьшилась в 8 раз. В 1931 г. при катастрофическом паводке по рекам Янцзы и Хуанхэ было затоплено 8 млн. га, урожайность риса снизилась на 38%, хлопка — на 24. Большие наводнения наблюдались в 1935 и 1938 гг.

После освобождения страны сразу же в широких масштабах было развернуто водохозяйственное строительство, благодаря чему бедствия от засухи и наводнений значительно уменьшились, но они еще окончательно не ликвидированы.

СОСТОЯНИЕ ОРОШЕНИЯ КИТАЯ

Китай — страна с развитой гидротехникой и орошением. В древности она славилась Великим Китайским каналом (начинающимся у Пекина и кончающимся у Ханчжоу) и противоприливными дамбами. Некоторые оросительные системы (на притоках Янцзы) существуют более 2 тыс. лет и до сих пор орошают сотни тысяч гектаров. Миллионы запруд и водоемов в южных районах рисового земледелия, колодцы и чигири в Северном Китае, кяризы и водооткачные колеса с древних времен были важными орудиями крестьян в деле обеспечения орошаемых земель водой.

После образования КНР развернуты работы по регулированию крупных рек, восстановлены и упорядочены имеющиеся оросительные сооружения и системы. На участке главного русла Хуанхэ в ближайшие годы закончится строительство многих крупных водохранилищ, имеющее большое значение не только для борьбы с паводками и выработки энергии, но и для орошения Северного Китая и Великой Китайской равнины. В результате строительства гидроузла Санься будет разрешена проблема борьбы с наводнением на р. Янцзы, получена громадная мощность и обеспечено прохождение до Чунциня (после выправления фарватера) морских судов водоизмещением 10 тыс. т.

Осадки в Китае выпадают сосредоточенно, в результате сезонное колебание стока в реках очень большое и вариация годового и паводкового стока также очень велика. Поэтому сооружения для накопления воды имеют важнейшее значение для развития орошения, гидроэнергетики и в борьбе с паводками. Однако такая схема борьбы с наводнением вступает в противоречие с энергетическим комплексом. Регулирующая роль водохранилища сильно ограничивается, так как паводковый сток занимает большую часть всего объема водохранилища. Например, Гуантинское водохранилище на р. Юндинхэ было запроектировано в расчете на один паводок в тысячу лет. Общая емкость водохранилища — 2,3 км³, в том числе мертвый объем — 0,6, доли объема борьбы с паводком — 1,05 и полезный объем — 0,65 км³. Вторым примером может быть водохранилище Мэйшань. Оно было запроектировано на паводок раз в сто лет и проверено на паводок раз в тысячу лет. У него мертвый объем занимает 15%, емкость для борьбы с паводками — 60, а полезная емкость — 25. Вследствие этих условий коэффициент регулирования стока водохранилища составляет только 60%, а иногда даже ниже 50%. Такую регулирующую способность водохранилищ с энергетической точки зрения надо считать неудовлетворительной.

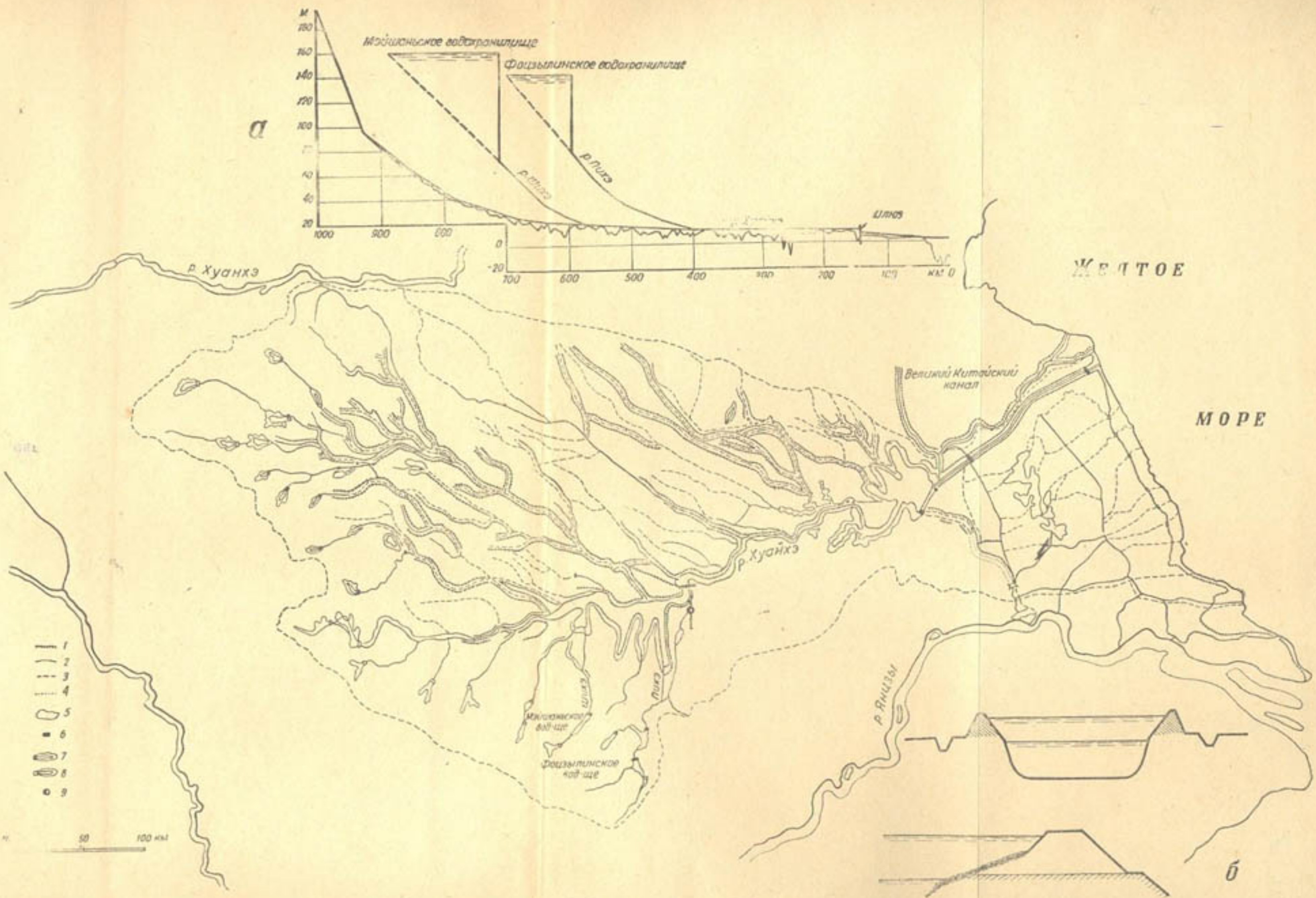


Рис. 3. Схема бассейна р. Хуайхэ:

а — продольный профиль; б — типовые профили дамб в среднем течении.
 1 — существующие обвалования; 2 — бытовое русло; 3 — углубленное русло; 4 — проектируемое углубленное русло; 5 — водохранилища для аккумуляции стока; 6 — гидроузлы;
 7 — существующие водохранилища; 8 — проектируемые водохранилища; 9 — туннель.

БОРЬБА С НАВОДНЕНИЯМИ В БАССЕЙНЕ р. ХУАЙХЭ

После образования КНР Коммунистическая партия и правительство Народного Китая стали уделять большое внимание водохозяйственному строительству. Главная задача водохозяйственного строительства на ближайшие годы — постепенная ликвидация наводнения и засухи и тем самым обеспечение роста сельскохозяйственного производства, развития промышленности и судоходства. Основная часть таких работ уже проведена; из них наиболее значительные — на Хуайхэ. Здесь вступило в строй много водохранилищ; построено и отремонтировано много дамб, расчищено русло Хуайхэ и ее главных притоков, а также в основном закончены работы по ликвидации затопления от местного стока.

В правобережной части бассейна р. Хуайхэ холмистый и горный рельефы составляют 34,5% всей площади бассейна, 58,4% занято равнинами и 7,1 — озерами и низинами. Протяженность реки 1000 км. Расстояние по прямой от устья до истока — 530 км, коэффициент извилистости — 1,7. Общее падение реки — 200 м, средний уклон — 0,2%, площадь бассейна — 187 000 км².

Хуайхэ можно разделить на три участка: верхний — от истока до г. Хунхэкоу (длина участка — 364 км, падение — 177 м, т. е. 89% от общего падения реки); средний — между Хунхэкоу и Чжунду — населенным пунктом у выхода из оз. Хуаньцеху (длина участка — 490 км, средний уклон его — 0,02%); нижний — ниже Чжунду до моря (длина 146 км, средний уклон — 0,036%).

В период летних ливней образуются пики паводков, вызывающие резкое повышение горизонтов воды в Хуайхэ и ее притоках. Вследствие недостаточной пропускной способности русла паводковые воды в громадном количестве разливаются по прилегающей к реке территории и заполняют озера и низины. Для предупреждения затопления широкой равнины левобережья на северном берегу Хуайхэ возведена защитная дамба, однако она не может оградить местность от катастрофических паводков.

Высокие горизонты воды в главном русле препятствуют спуску местного стока с равнинного левобережья в Хуайхэ, что приводит к затоплениям больших территорий. Равнина на севере расположена на низких отметках: поверхность ее приблизительно на 6—7 м ниже паводковых горизонтов в Хуайхэ. На низовом участке отметки земли на 12 м ниже отметок паводковых горизонтов. В случае катастрофического паводка прорыв дамбы у оз. Хуаньцеху вызовет почти полное затопление равнины. Кроме того, реки, впадающие в море, подвержены подпорам морских приливов, вследствие чего в этом районе возможны затопления местным стоком даже в обычные годы.

Хуанхэ питается в основном за счет дождевых осадков, выпадающих главным образом в период апрель — сентябрь. Среднее количество осадков в центре бассейна равно примерно 800 мм, из них на июль приходится 20—40%. Суточные осадки в количестве более 500 мм называются ливнями. Максимальное количество ливневых осадков за трое суток достигает 470 мм (при обеспеченности один раз в 560 лет), за 30 суток — 1265 мм (при обеспеченности один раз в 330 лет).

Затопление местным стоком происходит от ливней, выпадающих на части бассейна. В низовьях бассейна Хуайхэ отмечаются большие ливни во время прохождения тайфуна. Совпадение действия воды и ветра вызывает прорыв дамбы и наводнения.

Среднемноголетний расход воды Хуайхэ у Чжунду составляет $995 \text{ м}^3/\text{сек}$, максимальный — 2858 и минимальный — 210. В пойме Хуайхэ много озер и низин, могущих регулировать сток паводка, поэтому паводки Хуайхэ характеризуются большой продолжительностью (иногда три-четыре месяца) и величиной стока.

Особенность реки — ее малая мутность. Среднегодовая мутность — $0,5\text{—}0,8 \text{ кг/м}^3$, т. е. вода относительно светлая. Колебания горизонтов от минимума до максимума достигают 12 м (в среднем 8 м). В прошлом устье реки было глубокое и широкое. Морской прилив мог доходить до входа в оз. Хуаньцеху.

В 1194 г. Хуанхэ вторглась в бассейн Хуайхэ, в результате чего русло на нижнем участке было занесено наносами. В то время у оз. Хуаньцеху была построена плотина для обеспечения судоходства по Великому каналу. Одним из назначений озера явилось аккумулярование чистой воды Хуайхэ. Однако в озеро часто впадали воды Хуанхэ, поэтому дно его постепенно повышалось. В настоящее время отметки дна озера Хуаньцеху на 2 м выше отметок дна Хуайхэ у г. Бонфу (200 км вверх от озера), что затрудняет спуск паводковых вод из среднего течения Хуайхэ.

В 1885 г. Хуанхэ изменила свое направление и стала протекать севернее бассейна Хуайхэ. Прежнее русло Хуайхэ у устья было совершенно заилено. Отметки дна стали выше поверхности прилегающих земель. Хуайхэ стала впадать в Янцзы, потеряв свое устье в море.

Работы по регулированию Хуайхэ начались в 1950 г. Основная цель — борьба с наводнениями. Так, на ее притоках созданы водохранилища Фоцзылин, Мэйшань и др. Суммарная емкость всех водохранилищ на притоках составляет $4,82 \text{ км}^3$. На среднем течении Хуайхэ пять озер-низин превращены в водоем для задержания и регулирования паводков; суммарная емкость — 17 км^3 . На притоках выстроено семь водоемов-низин с суммарной емкостью 1 км^3 . Общая длина дамб, возведенных по берегам рек, достигает 5854 км. Высота дамб — от 4 до 7 м (в отдельных местах — до 10). Протяженность участков рек, на которых были произведены углубления и расчистка русла, равна 7647 км. Построено семь судоходных шлюзов.

Опасность наводнений в бассейне уменьшилась. Условия для развития орошения и использования водной энергии улучшились. В результате срезки пика паводка среднее и нижнее течение главной реки способно теперь пропустить паводок обеспеченностью в 30 лет, соответствующий паводку 1954 г.

В последние годы проводятся также работы по осушению болот и озер. Необходимо осушить 80 тыс. га, но пока осушено более 20 тыс. Наряду с этим расчищаются русла рек, в частности Бохэ, где устроен соединительный канал на $1200 \text{ м}^3/\text{сек}$ (длина 50 км).

По схеме переустройства строятся еще двенадцать водохранилищ и объединяются в одно водохранилище несколько озер. Одновременно с этим намечено оросить 6 млн. га и получить мощность $220\,000 \text{ кВт}$, тогда будет обеспечено регулирование стока для паводка 2-процентной обеспеченности. На эти работы потребуется около 10 лет.

Полный объем Мэшаньского водохранилища на р. Шихэ (приток Хуайхэ) $2275 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, мертвый — $430 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, полезный — $430 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, объем для аккумулярования паводков — $1840 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Максимальный расход воды р. Шихэ — $16\,400 \text{ м}^3/\text{сек}$. Среднегодовой сток Шихэ — $1380 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Тоннель в период строительства пропускал $430 \text{ м}^3/\text{сек}$. Водосброс имеет семь пролетов по 12 м. Плотина водохранилища — контрфорсная, основание — гранит, прочность $1\,000\text{—}1\,200 \text{ кг/см}^2$.

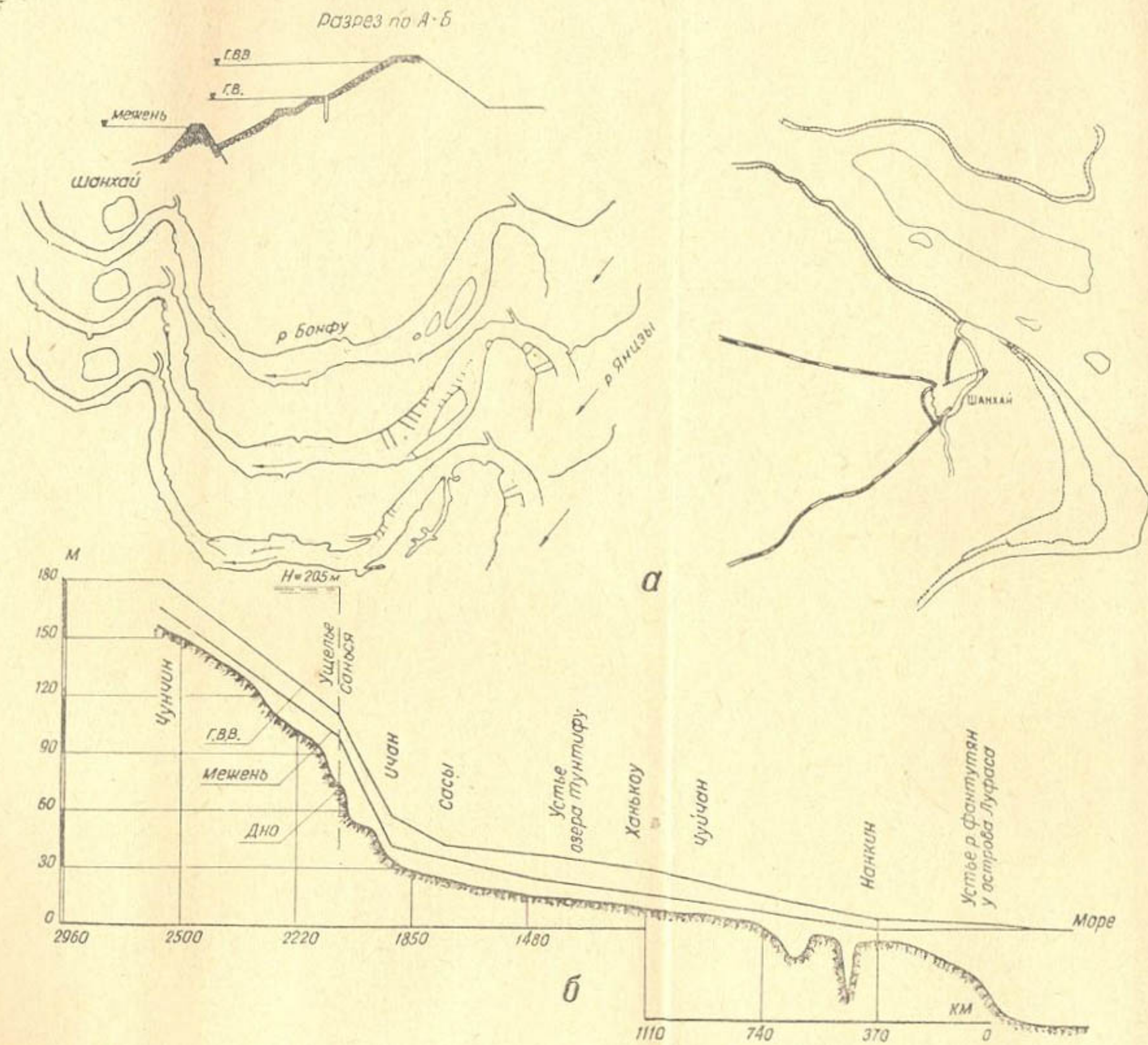


Рис. 4. Планы (а) и продольный профиль (б) р. Янцзы.

Такова же конструкция плотины Фоцзылинского водохранилища (рис. 5). В отдельные годы весь сток зарегулирован. Плотина расположена на скале.

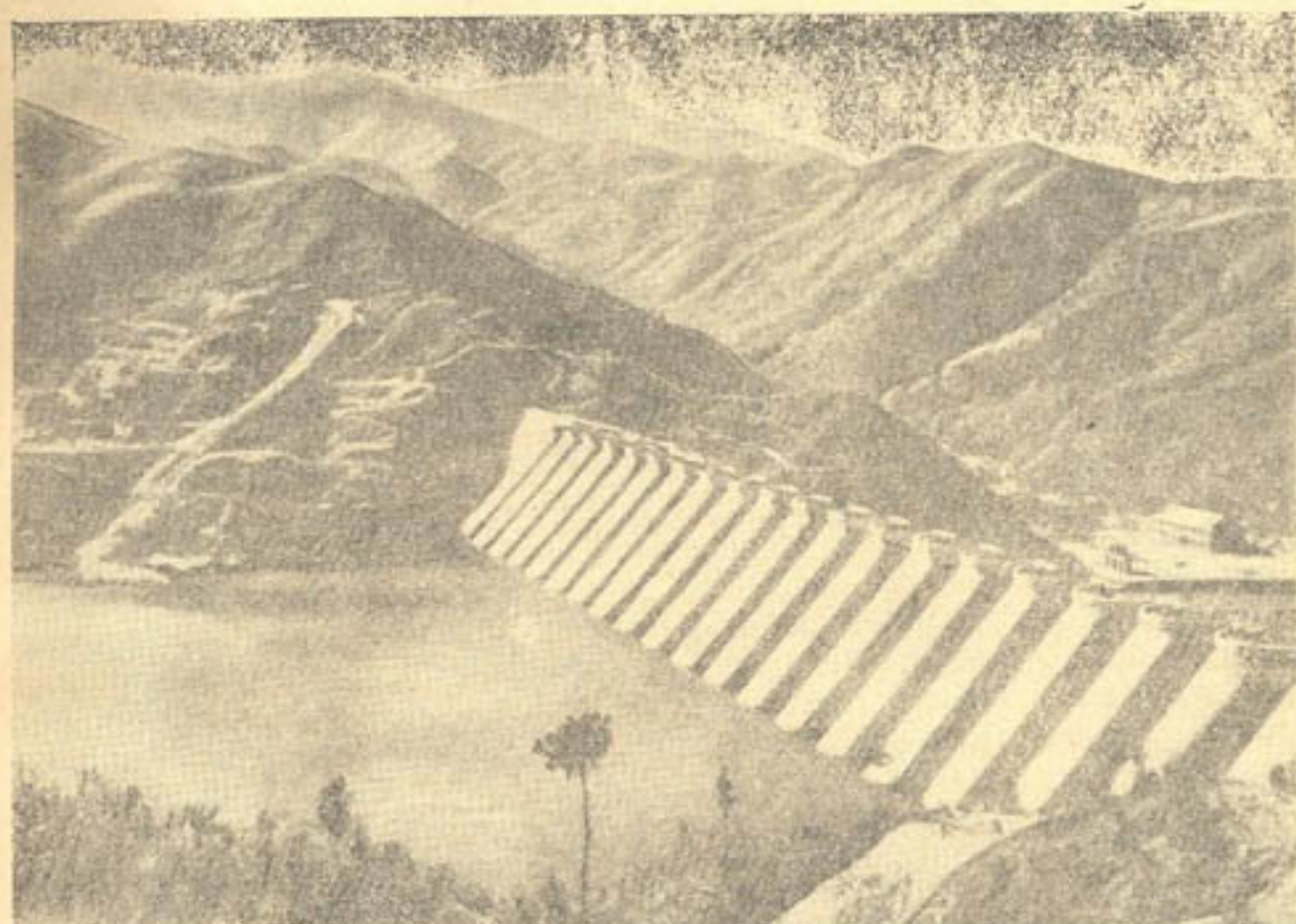


Рис. 5. Плотина Фоцзылинского водохранилища.

БОРЬБА С НАВОДНЕНИЕМ И ЭРОЗИЕЙ ПОЧВ В БАСЕЙНЕ р. ХУАНХЭ (ЖЕЛТОЙ)

С 1946 г., т. е. после освобождения Китая, начато регулирование Хуанхэ. За последние годы для укрепления дамб выполнены земляные работы объемом более 130 млн. м³. Дамбы протяженностью 1800 км уже наращены выше максимального горизонта паводка 1933 г. на 1—3 м. По берегам Хуанхэ высажено более 10 млн. деревьев. На некоторых участках созданы паводконакапливающие районы.

Бассейн Хуанхэ — один из важнейших сельскохозяйственных районов Китая. Там выращиваются главным образом хлопок и пшеница. Однако из-за неравномерности осадков сельскохозяйственные культуры часто страдают от засухи. В прошлом поля низовьев Хуанхэ не орошались водами этой реки. В 1952 г. в провинции Хэнань была создана Иньхуанская оросительная система для использования воды Хуанхэ. Это обеспечило орошение 50 тыс. га полей и создало условия для судоходства по р. Вейхэ от г. Синьсяна до Тяньцзина.

Комплексная схема коренного регулирования и использования водных ресурсов бассейна Хуанхэ (рис. 6) уже составлена и принята на Второй сессии Всекитайского собрания народных представителей первого созыва. Схема предусматривает в ближайшие десятилетия возведение 46 приплотинных гидростанций на главном русле и притоках Хуанхэ, вследствие чего река превратится в каскадную. Создание нескольких водохранилищ на ее притоках предусматривает на-

копление паводковых вод, задержание наносов и регулирование стока, развитие орошения, судоходства, выработку электроэнергии и промышленное водоснабжение. Наиболее крупные узлы с водохранилищами намечено построить в створе Саньмынься (три ущелья) и Люцзяся.

Вопрос упорядочения водного режима Хуанхэ сильно осложняется тем, что река и ее притоки несут много наносов. В среднем ее течении находится самое мощное в мире лессовое плато площадью в 370 тыс. км². Толщина пластов лесса колеблется от 20 до 50 м, доходя местами до 100 м. Лесс отличается мелкозернистой структурой, склоны его массивов крутые. Это вызывает быстрое вымывание лесса во время дождей и сильное заиление Хуанхэ в нижнем ее течении, результатом чего являются наводнения русла.

В нижнем течении ложе Хуанхэ, берега которой ограждены дамбами, поднимается местами над поверхностью земли от 3 до 10 м. Среднегодовая мутность реки в районе уезда Женьмянь и провинции Хэнань составляет в среднем 34 кг/м³, в период сильных дождей мутность на притоках увеличивается до 480 кг/м³, а при исключительно сильных наводнениях — до 580. Даже самое название реки — Хуанхэ, т. е. Желтая, — говорит о том, что она несет много глинистых частиц и ила. Известный современный китайский специалист Ли-и-чжи еще в 1931 г. указывал на необходимость предохранения почвенного слоя лессового плато от размывания, а также сооружения водохранилищ в среднем течении и на притоках.

До победы народной революции в Китае вопросы эффективного упорядочения водного режима Хуанхэ оставались нерешенными. В 1946 г. американские советники гоминдановского правительства утверждали, что обуздание реки потребует нескольких столетий. Теперь намечен путь комплексного использования Хуанхэ, в плане которого предусмотрены мероприятия по борьбе с паводками, снабжение электроэнергией промышленности, орошение новых массивов, судоходство, водоснабжение городов и промышленности и т. д. Перспективным планом намечается осуществить, в первую очередь, каскад гидроэлектростанций и водохранилищ в среднем течении Хуанхэ. Первой из них является гидроэлектростанция у Саньмынься в 20 км от гор. Шаньсянь, где проходит 92% стока реки.

Строительство плотины и водохранилище Саньмынься ослабят силу наводнений на нижележащем участке, оросят большие площади пахотной земли, создадут мощную гидроэлектростанцию до 1 млн. квт (она будет вырабатывать в среднем 4,6 млрд. квт·ч в год). Русло в районе Саньмынься очень узкое и устойчивое, его образуют твердые породы. Емкость водохранилища — 36 км³, сток наносов — 1,5 км³. Срок заиления мертвого объема — около 50 лет.

После завершения строительства плотины и гидроэлектростанции в ущелье Саньмынься возможно будет снизить расход воды, сбрасываемой через плотину, до 6—8 тыс. м³. В бытовых условиях в пик паводка расход достигает 9 тыс. м³/сек, в межень снижается до 600 м³/сек и в отдельные периоды — до 300 м³/сек.

Строительство плотин на Хуанхэ не только задержит наносы, но и приведет к размыву русла и снижению горизонтов воды в нижних бьефах на большом протяжении.

В бассейне Хуанхэ сильно развита эрозия почв. По данным гидрологической станции Шаньчжоу (1935 г.), главным источником наносов является овражисто-холмистая область, площадь которой 232,477 км²; среднегодовое количество смыва почв достигает 10 тыс. т/га и более.

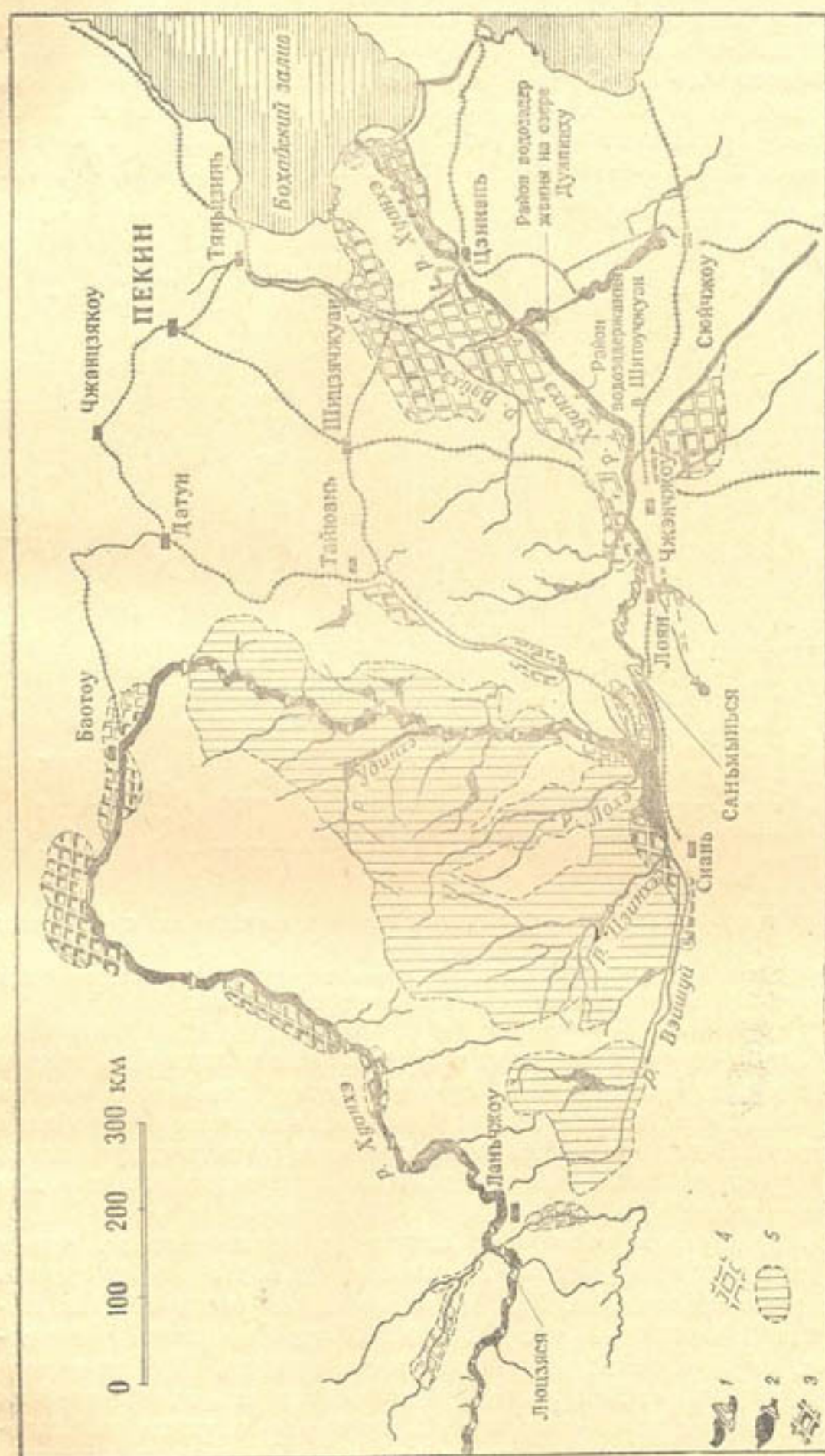


Рис. 6. Схема регулирования и комплексного использования р. Хуанхэ:

1 — гидротехнические сооружения; 2 — водохранилища на притоках; 3 — районы орошения по плану первой очереди; 4 — районы орошения по перспективному плану, 5 — основные районы водо- и почвозащиты.

Сильная эрозия обедняет почвы. Результаты анализа почв района Шэньбе (северная часть провинции Шэньси) показали, что в 1 т смытой почвы содержится 0,6—1,5 кг азота, до 1,5 кг фосфора и около 20 кг калия. Среднегодовые осадки составляют здесь 250—500 мм. Распределение их по годам неравномерно (за июль—сентябрь количество осадков достигло 50—70% от среднегодовых). Ливни чаще всего проходят в период май—сентябрь. Средняя интенсивность их примерно 1 см/мин, продолжительность 20—30 мин., а максимальная — 2,5 см/мин, длительность не более 5 мин. Ливни увлекают за собой смытую почву лессовых районов.

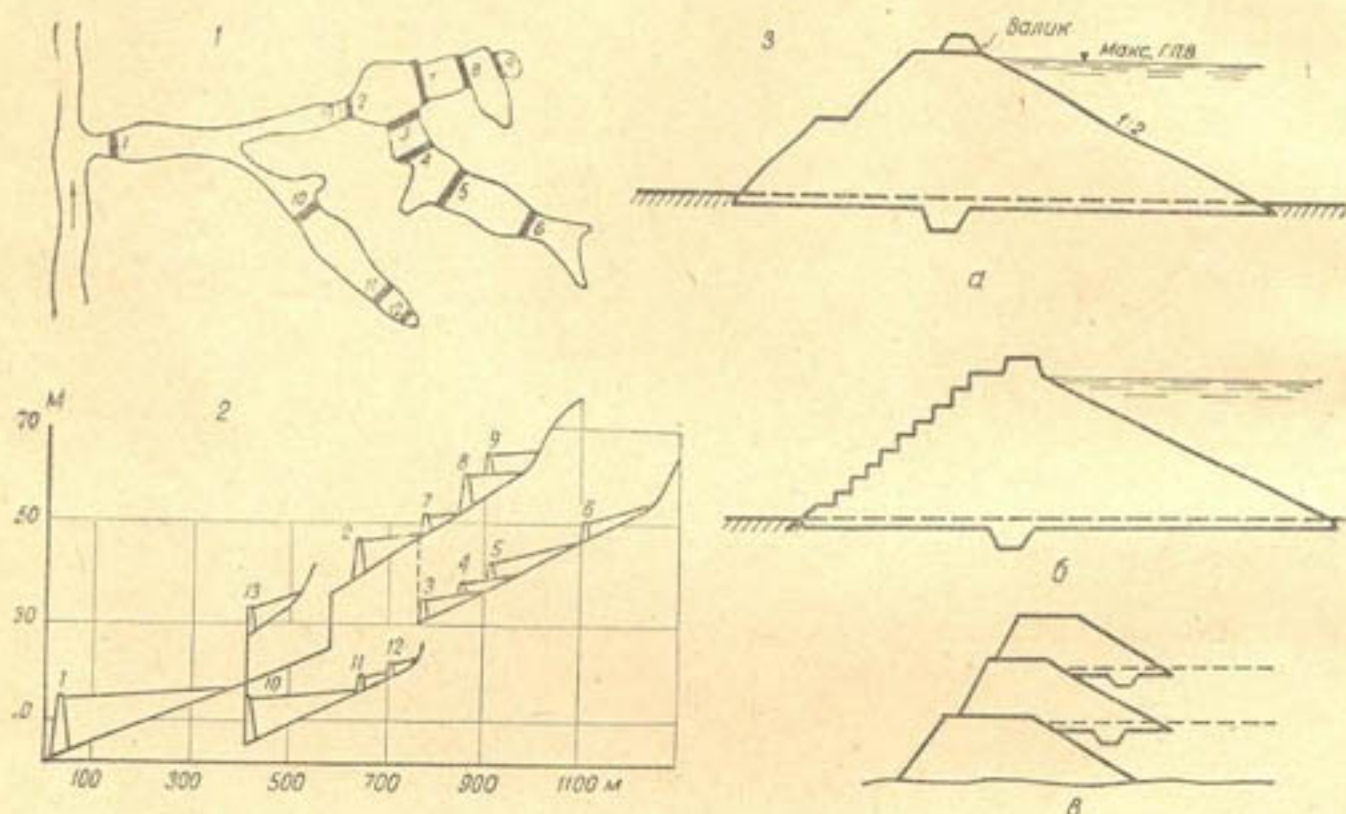


Рис. 7. Размещение и профили земляных плотин по удержанию почв от смыва (уезд Митань, овраг Нянь-Пянь Мах):
1 — план; 2 — продольный профиль; 3 — поперечные профили: а — обычный тип, б — террасовый тип, в — схема наращивания плотины.

На основе проведенных наблюдений работники водного хозяйства Китая пришли к заключению, что строительство земляных плотин требует дальнейшего усовершенствования. Большинство сооружений после неоднократных испытаний ливнями различного типа сохранились целыми; результаты этих наблюдений должны послужить основой для будущих проектировок.

Возведение в оврагах земляных плотин задерживает наносы и позволяет создать пахотные земли, аккумуляцию воды для орошения и борьбы с наводнениями (рис. 7). Пять земляных плотин было построено в овраге Цзю-Юань-Гоу с 1953 по 1956 гг. Эти плотины задержали 1,760 тыс. м³ наносов, дали возможность оросить 12,5 га пахотных земель, увеличили на 73,3 га орошаемую площадь, избавили 8 га пахотных земель от бедствий наводнений, кроме того, создали благоприятные условия для развития рыболовства и получения гидроэнергии.

Строительство земляных плотин в оврагах необходимо тесно связывать с применением противоэрозионных мероприятий на склонах и в оврагах (рис. 8). Только в этом случае земляные плотины являются устойчивыми и эффективными мероприятиями для уменьшения при-

тока наносов в головном русле Хуанхэ. Например, общая емкость пяти плотин в овраге Цзю-Юань-Гоу составляет 4 017 285 м³. В течение четырех лет 43,81% этих водохранилищ были наполнены наносами.

Противоэрозионные мероприятия на склонах задержали в районе 61 252 м³ наносов и в некоторой степени уменьшили приток паводковых вод. Такие мероприятия проводятся на площади более 10 млн. га. Это работы огромного масштаба. В прошлом подобный план подвергался критике консервативных инженеров. Американские инженеры высказывались, что на эти работы потребуется около 1 000 лет.



Рис. 8. Противоэрозионные мероприятия на склонах (среднее течение Хуанхэ).

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О РЕГУЛИРОВАНИИ р. ЯНЦЗЫ У ШАНХАЯ И НАНКИНА

Длина реки — 4 600 км, расход воды в устье — 90 тыс. м³/сек, гидроэнергетические запасы — $200 \cdot 10^6$ квт, средний модуль стока 12—25 л/км². Морские суда водоизмещением до 10 тыс. т могут проходить по реке до г. Ухань, т. е. примерно на 400 км от моря.

В бассейне Янцзы (27% всей площади КНР) собирается 60% урожая риса всей страны. Площадь орошения в бассейне составляет 11 млн. га.

По длине реку можно разделить на четыре участка: равнинную часть — от Шанхая до г. Ичана, котловину — от Ичана до Сычуаня, холмистую зону с высотой холмов 50—100 м, горную и высокогорную зоны. На рис. 4 приведен продольный профиль первого участка.

Озера в нижнем течении реки занимают значительную территорию, способствуя регулированию стока реки.

Регулирующая емкость водохранилищ-озер 55 км³. Минимальная температура воздуха в бассейне 2°. Осадков выпадает 500—1 500 мм в году, однако распределяются они крайне неравномерно по бассейну

и по сезонам. В целом этот бассейн надо считать районом достаточного увлажнения. Здесь также происходят большие наводнения, так, например, в 1938 г. на площади 3,8 млн. га от наводнения пострадало 29 млн. человек.

Для борьбы с наводнением возведены дамбы обвалования высотой до 12 м и устроены аккумулярующие районы (озера) путем затопления пониженных мест и их обвалованием.

Орошение в бассейне Янцзы производится преимущественно из прудов (93%), самотеком орошается небольшая территория — около 3,1%, механический водоподъем (чигирное орошение) из колодцев используется на небольшой площади (3,9%). Для выращивания одного урожая риса на 1 га требуется 9 тыс. м³ воды и 6—12 тыс. м³ осадков. Для выращивания одного урожая риса требуется в оросительный период 115 суток, для двух урожаев — 180. Орошаемая площадь может быть увеличена за счет использования новых земель в верхнем течении реки и осушения озер — в нижнем.

В перспективе решено перебросить 50 км³ воды из Янцзы в бассейн Хуайхэ и Хуанхэ путем строительства канала на расход 1 200 м³/сек. Длина канала предполагается равной приблизительно 800 км. Для борьбы с наводнением в бассейне Янцзы намечено регулировать сток в объеме 150 м³, для чего потребуются построить в среднем и верхнем течении Янцзы несколько водохранилищ.

В устье Янцзы расположен Шанхай, находящийся на расстоянии 27 км от реки. Примерно 1 000 лет назад Шанхай находился на берегу Янцзы; смещение реки в сторону и к морю составляло 27 м в год.

Через Шанхай протекает р. Бонфу, по которой из Янцзы морские пароходы входят в порт. Во время прилива горизонт воды в Бонфу увеличивается на 2,7—3,2 м. Набережная закреплена каменными плитами толщиной 0,25—0,30 м. Заложение откоса от 0,30 до 1,0.

В Бонфу, в пределах города, впадает р. Судзоухэ; по ней перевозится большое количество грузов. Эта река используется также для сброса сточных вод, вследствие чего она сильно загрязнена. Руслу обеих рек сильно заилены. В период отлива морские суда не могут входить и выходить из Шанхайского порта, так как глубина русел уменьшается. Приливы бывают два раза в сутки — в 12 час. дня и в 12 час. ночи.

Весьма серьезные затруднения для судоходства имеются в устье реки, т. е. на баре. Влияние нагона волны с моря вверх по течению распространяется на 460 км. При нагоне волны с моря горизонт воды в Янцзы в межень увеличивается в устье на 3,7 м. При отливе волны проход больших судов в реку и порт невозможен. С целью увеличения судоходной глубины в устье (на перекате) устраивают прорезь глубиной около 2 м, шириной 200 м и длиной 15 км. Объем выемки по прорези достигает 9 млн. м³. Однако устройство такой прорези оказывается недостаточным, так как она будет заноситься в процессе эксплуатации; для ее поддержания в течение вегетации надо удалить еще примерно такой же объем грунта.

Ниже приведен размер дамб обвалования вдоль Янцзы в районе Шанхая.

Высота дамб, м	Ширина, м	m ₁	m ₂	Грунт	Запас высоты дамб, м
5—6	3	2,0	1,5	Мелкий песок	0,5—0,0
10	6	2,0	1,5	.	0,5—0,0

На многих участках в дамбах нет запаса, они наращиваются в процессе эксплуатации.

Близ Шанхая имеется морская дамба. Откосы ее закреплены твердым камнем, а в подводной части устроен бетонный парапет.

С течением времени отметки дна и берегового откоса изменяются, поэтому на многих участках современная высота дамб не отражает их полной высоты за исторический срок.

Направление ветра и волн в устье Янцзы зимой бывает с севера, ранней весной — с северо-востока, весной — с юго-востока и юго-запада, летом — с юго-востока, осенью — с запада. Ветер ослабляет или увеличивает высоту уровня в устье реки на 0,3—0,6 м.

БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ НА р. ЯНЦЗЫ У НАНКИНА

Устойчивая ширина реки в бытовых условиях — около 2 тыс. м; в месте паромной переправы, где берега закреплены, ширина — около 1100 м. Среднегодовой расход воды в этом створе около 30 тыс. м³/сек, уклон 0,00008, т. е. примерно равен уклону Волги в среднем течении. Русло сложено из грунта с максимальной крупностью частиц 0,30 мм и средней — 0,18 мм.

Соотношение $\frac{B}{H} = \frac{2000}{16} = 130$ такое же, что и для Волги в нижнем течении, где $\frac{B}{H} = \frac{1480}{11} = 135$. Число Фруда для Янцзы и Волги составляет около $F_2 = 0,022$. Таким образом, по форме русла и числу Фруда Янцзы можно считать подобной Волге. Наносов в Янцзы так же мало, как и в Волге. В районе Нанкина производятся крепления обоих берегов на протяжении 1,5 км. Эти крепления проводятся там очень давно. Берег от размыва в основном защищен тюфяками толщиной 0,75 м, пригруженными камнем слоем 0,5:0,7 м. На поверхности тюфяка с целью дополнительной пригрузки установлены колья для задержания ила. Такое увеличение шероховатости поверхности тюфяка облегчает работы при опускании тюфяка на дно. Откосы дамб обвалования выше горизонта меженей закреплены каменной отмосткой из рваного камня.

Таковы некоторые общие сведения о современном состоянии водного хозяйства КНР и мерах по его коренному улучшению.

Ю. И. ГОРСКИЙ, И. К. НИКОЛАЕВ

ЗНАЧЕНИЕ ЧАРВАКСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ДЛЯ РАЗВИТИЯ ОРОШЕНИЯ В ЧИРЧИК-АНГРЕН-КЕЛЕССКОМ ИРРИГАЦИОННОМ РАЙОНЕ

Чирчик - Ангренский ирригационный район (ЧАКИР) Узбекской ССР — один из самых густонаселенных и промышленно развитых районов Средней Азии. Здесь сосредоточены крупнейшие предприятия машиностроения, химической промышленности, цветной металлургии, Ангренский угольный разрез. Это район развитого хлопководства и перспективного поливного земледелия.

По нашему мнению, при разработке семилетнего плана развития хлопководства, животноводства, сельскохозяйственного и промышленного строительства в указанном районе необходимо уделить большое внимание реализации постановления ЦК КПСС о создании мощных садово-огородных зон вокруг промышленных центров и столиц. Как установлено институтом „Саогидэп“ при разработке схем комплексного использования реки Чаткал, в названном ирригационном районе имеется возможность почти удвоить орошаемую площадь путем осуществления, наряду с сезонным регулированием стока р. Чирчик в Чарвакском водохранилище, многолетнего регулирования стока р. Чаткал в Баркрауксском горном водохранилище. Такая схема пока еще не разработана.

Имеющимися проработками (Институт „Средазгипроводхлопок“) рассматривается орошение 542 тыс. га площади, а именно, тыс. га:

Показатели	УзССР	КазССР	ТаджССР	Всего
Существующее орошение	291	44	—	335
Дальнейшее развитие				
I очередь (ближайшая перспектива)	344	84	—	428
II очередь (перспектива)	378	162	2	542

Важным фактором при разработке проектов орошения должна быть экономическая целесообразность такого мероприятия. Институт „Средазгипроводхлопок“, при изучении этого вопроса в начале 1960 г., пришел к выводу, что повышение водообеспеченности земель существующего орошения при благоприятных физико-географических условиях обойдется для данного района примерно на 40% дешевле, чем в среднем по другим районам республики, и затраты составят около 2,5 тыс. руб/га.

Обеспечение ирригационно-хозяйственного освоения площадей нового орошения в ЧАКИРе потребует меньших капиталовложений,

чем в других районах республики, так как Чирчик - Ангрен - Келесский бассейн относится к числу весьма благоприятных по природным и хозяйственным условиям. Почвы его не засолены, не заболочены и не требуют устройства дорогих мероприятий для предупреждения этих явлений. Обжитость района обеспечивает новые площади рабочей силой для ирригационного и сельскохозяйственного освоения.

Водообеспеченность существующих площадей орошения связана с тем, что р. Чирчик характеризуется большой неравномерностью стока, в силу чего режим орошения не отвечает требованиям ирригации, особенно в наиболее ответственной второй половине вегетационного периода. В существующих условиях в годы нижесредней и даже средней водности отмечается значительный недополив площадей, приводящий к снижению урожайности хлопка и других культур.

Так, по данным Министерства водного хозяйства УзССР, за последнее десятилетие (которое было заметно полноводнее среднего за весь шестидесятилетний ряд гидрометрических наблюдений) недостатки воды для орошения выразились в следующих цифрах:

Год	Продолжительность непрерывных недостатков, декады	Объем недостатка, млн. м ³	% от потребления за период
1950	7	420	30
1951	5	260	32
1952	—	—	—
1953	5	210	19
1954	—	—	—
1955	8	360	23
1956	5	320	28
1957	7	600	36
1958	—	—	—
1959	—	—	—

Если исключить из рассмотрения максимальные по водности четыре года — 1952, 1954, 1958 и 1959, — повторение которых по наиболее ответственному для вегетационного периода месяцу (август) вероятно лишь на 10—18%, то за прочие шесть лет последнего десятилетия отмечены затяжные и глубокие недостатки воды. Даже в сравнительно многоводный 1953 год положение сельского хозяйства было неблагоприятным: нехватка воды наблюдалась подряд в течение пяти самых жарких декад лета и по объему составила 210 млн. м³, или 19% потребности за это время.

Положение сельского хозяйства в остальные средние и маловодные годы было значительно хуже. Нормы орошения по всем культурам, включая хлопчатник, вынужденно урезались на 20—30% и более от действительно необходимых. Это неизбежно приводило к снижению возможного урожая не менее чем на 20%.

Большая неравномерность стока по годам и в течение одного года, при сравнительно коротком периоде недостатков, делает сезонное регулирование в целях ирригации, бесспорно, необходимым и выдвигает его на первое место среди всех прочих возможных мероприятий по повышению водообеспеченности для дальнейшего развития сельского хозяйства и промышленности Чирчик - Ангрен - Келесского экономического района.

Поднятие водообеспеченности орошаемых земель за счет повышения к. п. д. существующих систем для данного района, по-видимому, будет неперспективным.

Кроме того, фильтрационные воды со всей площади орошения в ЧАКИРе будут выклиниваться выше строящегося Чардаринского водохранилища и использоваться из него вновь на орошение в бассейне Сыр-Дарьи.

Для сезонного регулирования стока в интересах ирригации и гидроэнергетики надо зарегулировать все три реки — Чирчик, Ангрен и Келес. Последовательность регулирования и приносимый им эффект иллюстрируются данными таблицы.

Очередность ввода	Водохранилище	Река	Характер регулирования и назначение	Обеспечиваемый прирост орошения, тыс. га	Срок строительства
1	Тюя-Бугузское	Ангрен	Сезонное, для ирригации	23	Заканчивается
2	Чарвакское	Чирчик	Сезонное, для ирригации, энергетики и борьбы с паводками	158	Намечается
3	Б. Туркское	Ангрен	Сезонное, для ирригации, промышленности и борьбы с паводками	17—19	.
4	Шарапхантинское	Келес	Сезонное, для ирригации	5	.
5	Куруксайское	Н-Бозсу	То же (наливное)	30	В перспективе

Тюя-Бугузское и Куруксайское водохранилища при проектируемом развитии площадей могут быть наполнены только за счет стока р. Чирчик и поэтому будут полностью зависеть от Чарвакского водохранилища.

В таблице второй очередью сооружения показано Чарвакское водохранилище. Это водохранилище комплексного энерго-иригационного значения. При нем будет сооружена мощная гидроэлектростанция. Объем водохранилища—1420 млн. м³—позволяет не только удовлетворить сезонные требования ирригации в воде, но и часть стока многоводного периода перенести на межень, чем повысить зимнюю мощность и выработку электроэнергии нижележащего каскада гидроэлектростанций.

Отнесение части затрат по водохранилищу на ирригацию делает Чарвакскую гидроэлектростанцию высокoэкономичной и выдвигает ее в ряд первоочередных.

По нашему мнению, строительство Чарвакского гидроузла ввиду его комплексности и высокой экономической эффективности необходимо начать в ближайшее время.

К. А. АВЛЯНОВА

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕЛЕМЕХАНИЗАЦИЯ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Коренное изменение службы эксплуатации оросительных каналов путем оснащения средствами автоматики и телемеханики даст возможность превратить их в четко работающие водохозяйственные предприятия. Это может быть достигнуто применением современных комплексных средств автоматизации, позволяющих обеспечить централизацию не только контроля, но и управления (регулирования), что позволит резко улучшить оперативность в работе эксплуатационных органов и практически ликвидировать разрыв во времени между распоряжением и проверкой его исполнения.

В Советском Союзе имеется около 84 крупных магистральных каналов с расходом от 5 до 200 м³/сек и протяженностью от 10 до 350 км. Эти каналы оснащены дорогостоящими инженерными сооружениями.

Магистральные каналы можно типизировать по следующим признакам:

административно-хозяйственным —

а) межреспубликанского, б) межобластного, в) межрайонного значения;

по управлению —

а) самостоятельно управляемые, б) управляющиеся вместе с каналами другого порядка;

по назначению —

а) ирригационный (оросительный), б) ирригационно-энергетический, в) судоходно-энерго-оросительный, г) с машинным водоподъемом.

Нами изучались условия эксплуатации крупных магистральных каналов, с одной стороны, и имеющиеся в настоящее время средства автоматики и телемеханики — с другой, в результате чего даны схемы оборудования нескольких типичных каналов средствами автоматики и телемеханики.

Нашей задачей было — найти возможности совмещения учета и регулирования, выполняемых на определенном сооружении, и средства, допускающие их автоматизацию и телемеханизацию.

На основании технических условий для преимущественного применения можно предложить средства как для автоматизации и телемеханизации отдельных процессов — измерения (T_n), регулирования расходов воды или управления (T_y), сигнализации и контроля (T_c), — так и для комплексной автоматизации (совмещение функций T_n , T_y , T_c в данном устройстве).

При выяснении требований к средствам автоматики и телемеханики для применения их на оросительных каналах, а также требований оросительных каналов к средствам автоматики и телемеханики возникает вопрос, целесообразно ли приспособлять каналы к средствам автоматики и телемеханики или необходимо средства автоматики и телемеханики приспособлять к каналам?

Диапазон колебания горизонтов воды в каналах может быть довольно большим, практически же измеряемый горизонт колеблется в пределах 1—1,5 м. Измерение расходов воды производится главным образом на регулирующих сооружениях. Сравнительно редко встречаются гидрометрические посты, не совмещенные с такими сооружениями. Применяемые в настоящее время на оросительных каналах средства учета из-за несовершенства и неоперативного управления водораспределением дают возможность учитывать воду с точностью ± 10 . По этой причине оросительная вода расходуется неэкономно, что вредно отражается на урожайности сельскохозяйственных культур. Тяжелые условия эксплуатации на оросительных каналах приводят к необходимости применения простых и надежных приборов измерения, датчиков телеизмерения и телеизмерительных устройств. Желательны датчики с централизованным питанием (с диспетчерского пункта) или без местных источников электропитания. Точность измерения желательно повысить до $\pm 1—2\%$.

Все средства автоматики и телемеханики, применимые в условиях магистральных оросительных каналов, можно разделить на следующие три основные группы: средства измерения (учета) расходов воды, устройства автоматического и телемеханического регулирования управления водораспределением. Показание расхода может быть местным — на указывающем или регистрирующем приборе, находящемся на сооружении, — или с передачей на расстояние (ближнее — до 20 км и дальнее — сотни километров) с применением соответствующих датчиков и телемеханических устройств, о которых будет сказано ниже. Гидрометрические посты находятся, как правило, на водозаборных и водораспределительных сооружениях, расположенных на расстоянии от нескольких сот метров до десятков километров друг от друга.

Для автоматизации и телемеханизации учета воды служат следующие сооружения и приборы к ним.

Водомерное русло (тарированное) земляное или с облицовкой и устройством на нем автоматически действующего измерительного прибора (рекомендуется для крупных каналов). Участок канала должен быть прямолинейным с равномерным движением струй и устойчивым поперечным сечением, не размываемым и не заиляемым. Водосливы различных размеров рекомендуются на расход до 10 м^3 (при наличии достаточных уклонов в каналах — $i \leq 0,001$) преимущественно при незатопленном истечении. Водомерные пороги при наличии достаточных уклонов ($i \leq 0,01$) могут быть использованы при переменном режиме нижнего бьефа. Водомерные лотки Вентури Паршала лучше употреблять в случае отсутствия подпора со стороны нижнего бьефа или при подпоре не более 90—95%.

Для перечисленных сооружений могут быть применены автоматически указывающие или регистрирующие приборы и датчики телеизмерения. Лимниграфы рекомендуются для регистрации горизонтов (расходов) на источниках орошения перед головным сооружением. Для передачи на расстояние к водомерным приборам пристраиваются датчики телеизмерения и телемеханические устройства. Чувствитель-

ные элементы датчиков могут делиться на механические поплавки, турбинки, электрические пластинки, стержни и т. д.

Следующая группа водомерных сооружений — водомеры трубчатого типа с насадкой, кольцом, со сферическими и другими сопротивлениями с задним щитком. На этих сооружениях могут быть применены: дифференциальный водомер Глубышева (ВПГ-56), дифференциальные сельсины, реостатные или потенциометрические датчики (ДСУ и ВСПИ), динамический расходоуказатель (ДРС), роторный счетчик стока (СВН, САНИИРИ), счетчик стока (ИММ-2, АН УкрССР) и др.

Гидросооружения или затворы гидросооружений, автоматически регулирующие расходы воды, можно подразделить на такие основные типы: а) затворы-автоматы, действующие от электропривода или сервомотора, с автоматической установкой и чаще всего с поплавковым чувствительным элементом; б) затворы-автоматы, действующие от гидравлического привода; в) поплавковые затворы-автоматы с камерой давления; г) собственно автоматические затворы, действующие под напором воды вследствие своих конструктивных особенностей и не имеющие чувствительного элемента.

По месту расположения или типу гидросооружения следует различать: затворы-автоматы водозаборных плотин, сбросных сооружений, головных регуляторов, перегораживающих сооружений, открытых и закрытых водовыпусков (трубчатых).

По принципу действия различаются затворы-автоматы, поддерживающие заданный горизонт воды в верхнем бьефе $H = \text{const}$ и затворы, поддерживающие заданный расход в нижнем бьефе $Q = \text{const}$, по зависимости

$$\omega = \frac{1}{M \sqrt{z}} = \text{const}; M = \frac{1}{\sqrt{z}} = \text{const}; z = \text{const}.$$

Реконструкция, или замена большинства существующих регулирующих гидротехнических сооружений на вододействующие, связана, как правило, со значительными капиталовложениями, поэтому в данном случае для автоматизации регулирования затворами целесообразно применить электропривод с авторегулятором. Для этого необходимо устройство силовой линии электропередачи от временно работающей или постоянно действующей электростанции до автоматизируемых гидротехнических сооружений, а также устройство телефонной линии, связывающей пункт управления со всеми объектами регулирования. В данном случае рекомендуется электропривод асинхронный (короткозамкнутый) на переменном токе. Однако применение электропривода с авторегулятором нельзя считать лучшим решением вопроса (оно, скорее, вынужденное), и рекомендовать его следует только при указанных выше условиях. Более совершенные устройства автоматического регулирования — гидравлические (вододействующие) затворы. В настоящее время имеются различные их конструкции, разработанные для применения на оросительных каналах, но большинство из них недостаточно изучено в производственных условиях, и рассмотрены они не для всех случаев.

В отдельных случаях затворы работают при затопленном и неза-топленном истечении или, что чаще всего, при переменном режиме.

Для головного водозаборного сооружения при бесплотинном водозаборе рекомендуются затворы, автоматически поддерживающие заданный расход в магистральном канале. Они должны удовлетворять условиям полной автоматизации с непрерывным регулированием и не

допускать донных наносов в канал. Требуемая точность регулирования и чувствительность — до $\pm 3\%$ от нормального расхода. Исследования, проведенные в лаборатории автоматики и телемеханики САНИИРИ, показали нецелесообразность применения прямого телеуправления на оросительных каналах. В случае телемеханического управления электрифицированными затворами лучше управлять телездатчиком авторегулятора. В затворах гидравлического действия также следует применять телеуправление задатчиком.

Для поддержания заданного расхода порядка $5-10 \text{ м}^3/\text{сек}$ можно рекомендовать сегментные затворы в конструктивном оформлении типа Нейрпик, Мамышева, Бочкарева и Меркурьева. Каждый из них при трех-четырех пролетах может обеспечить общий расход $20-40 \text{ м}^3/\text{сек}$.

В случае плотинного водозабора сооружения нужно рассматривать в отдельности в зависимости от его назначения (плотина, водозаборное, сбросное сооружения).

Затворы плотины должны удовлетворять требованиям полной автоматизации с непрерывным регулированием (необходимая точность и чувствительность $\pm 3\%$ от Q или от H) и поддерживать заданный горизонт. Этим требованиям отвечают затворы секторные (барабанные) типа *drume-gate* (США), Ермаржа (Чехословакия), вальцовые, цилиндрические, крышевидные — типа „Дахвер“, сегментные на плотине Сальто-Пескаро (Италия) и др. В случае телемеханического управления этими затворами нужны телездатчики.

Затворы сбросных сооружений должны обеспечивать быстрый (в установленный срок) сброс излишних расходов воды и шуги, достигающих нередко нескольких сот кубометров в секунду.

Для сбросных сооружений пригодны водосливы практического профиля, самозаряжающиеся сифоны, клапанные затворы (плоские или сегментные), поплавковый затвор „Призма“ с камерой давления, секторные (барабанные) типа *drume-gate* или Ермаржа.

Головной регулятор магистрального канала при плотинном водозаборе может иметь затворы с электроприводом местного или дистанционного управления, но допускаются и автоматически действующие затворы, поддерживающие заданный расход. В данном случае выбор осуществляется только из экономических соображений. Затворы головного регулятора должны автоматически непрерывно поддерживать заданный расход в магистральном канале при возможном диапазоне колебания горизонта верхнего бьефа до $1-2 \text{ м}$ и Z до 1 м .

Линейные оперативные¹ гидросооружения надо разделить на узлы без перегораживающих сооружений, узлы с перегораживающими сооружениями и одиночные водовыпуски.

Рассмотрим возможные варианты автоматизации каждого из указанных типов сооружений.

Водовыпуски, расположенные группами или в одиночку, должны оборудоваться гидравлическими затворами постоянства расхода типа Алиева, Каграманова, Бочкарева и других или электрифицированными затворами с электрическим авторегулятором.

Узлы сооружений с перегораживающим сооружением следует автоматизировать следующим образом: перегораживающее сооружение снабдить гидравлическими затворами постоянства горизонта типа Финке, Нейрпик, Мамышева или оборудовать электрифицированным затвором с авто-

¹ Оперативными гидротехническими сооружениями называем сооружения, активно участвующие в водораспределении.

регулятором. В этом случае затворы водовыпусков узла могут остаться неавтоматизированными, так как достаточно раз в 5—10 дней отрегулировать затворы водовыпусков и, поддерживая $H = \text{const}$ в верхнем бьефе с помощью перегораживающего сооружения, пропускать заданный расход в водовыпуски. Концевые водораспределительные узлы нужно оборудовать сооружениями пропорционального деления воды с калиброванными отверстиями.

Рассмотрим вопрос телемеханизации управления водораспределением на магистральном канале.

Изучая имеющиеся конструкции телемеханических устройств, мы пришли к следующим выводам:

1) телемеханические устройства, разработанные для различных отраслей, не могут быть механически перенесены и использованы на оросительных каналах;

2) по принципу действия наиболее рациональным для оросительных каналов является телемеханическое устройство с частотным выбором на полупроводниковых элементах, рассчитанное на распределенное расположение объектов блочной конструкции, гибкое по своей структуре. Так как объекты на каналах располагаются на большом расстоянии в одиночку и небольшими группами (2—3 точки измерения; от 2 до 16 объектов регулирования — контроль, сигнализация выбора объекта, аварийная сигнализация отдельных объектов), телеустройство должно допускать линейно-узловую компоновку блоков и осуществлять цикл операций:

а) выбор объекта, телеизмерение, телеуправление задатчиком авторегулятора, контроль правильности управления (иногда требуется сигнализация о состоянии объекта, о неисправностях и об аварийном состоянии);

б) выявление возможности циклического телеизмерения;

в) осуществление телефонной связи по проводам телемеханики.

Большим препятствием в настоящее время для внедрения средств автоматики и телемеханики на оросительных каналах является полное отсутствие серийно выпускаемых устройств. Нет утвержденных технических условий для их конструирования и проектирования. Поэтому следует ускорить разрешение в научно-исследовательских организациях и проектных институтах перечисленных и других актуальных вопросов автоматизации и телемеханизации.

С. Х. АБАЛЬЯНЦ

РАСЧЕТ НЕЗАИЛЯЕМЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И ОТКРЫТЫХ ПУЛЬПОВОДОВ

Расчет незаиляемых оросительных каналов и открытых пульповодов связан с теорией движения взвесей, разработка которой сопряжена с трудностями проникновения в сложную структуру турбулентного потока. В частности, важный вопрос о взвешивающей или транспортирующей способности потока остается еще открытым в теоретическом отношении, поэтому неотложные запросы практики удовлетворяются пока эмпирическими зависимостями, которые выдвигаются и улучшаются по мере накопления фактов.

В нашей работе кратко излагается [1] приближенное решение задачи о взвешивании с доведением до практических приложений. Постановка такой задачи стала возможной теперь в результате накопления определенных сведений о характеристиках турбулентности и движении взвесей в потоках, в первую очередь, в оросительных каналах. В статье обобщены итоги многолетних исследований режима наносов в оросительных каналах Средней Азии и Закавказья.

В результате анализа данных многочисленных наблюдений о движении наносов в оросительных каналах мы получили для критической мутности опытные формулы, рекомендуемые для расчетов (§ 1), в последующем теоретически обоснованные.

Задача о взвешивающей способности решена на основе гипотезы о недостатке пульсационного давления у дна, связанном с крупномасштабными пульсациями в потоке, как главным факторе взвешивания (§ 2). Этот недостаток давления компенсируется повышением местного же давления вследствие подъема со дна насыщенных взвесью объемов воды; в результате устанавливается равновесие, определяющее взвешивающую способность потока.

Вопрос о гидравлических сопротивлениях при движении гидросмесей рассмотрен с учетом количественной оценки различных форм воздействия взвешенных частиц на гидравлику потока, с привлечением пока еще малочисленных материалов наблюдений (§ 3); поэтому полученные опытные решения предлагаются как ориентировочные. В заключение (§ 4) приводятся примеры решения различных задач по расчету незаиляемых оросительных каналов и открытых пульповодов, встречающихся в инженерной практике.

§ 1. ДВИЖЕНИЕ НАНОСОВ В ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

Наблюдения за режимом наносов в оросительных каналах, начатые в конце прошлого столетия в Индии, проводились также в Егип-

те, США и России. Широкое развитие такие работы получили в нашей стране после Великой Октябрьской революции в связи с развернутым в Средней Азии и Закавказье ирригационным строительством. Данные этих наблюдений, по мере их накопления, в виде расчетных формул обобщили В. В. Пославский, Г. С. Чекулаев, А. А. Черкасов, Г. О. Хорст и др. Наиболее полная сводка результатов исследований предвоенного периода представлена в работе Е. А. Замарина; полученные им опытные формулы вошли в ГОСТ 3908—47 [6].

Во всех опытных формулах введением уклона устанавливается по существу связь между „работой взвешивания“ наносов, понятие о которой было установлено еще В. Г. Глушковым, и работой, затрачиваемой потоком на сопротивления при движении. В исследованиях последнего времени содержится утверждение о существовании прямой пропорции между двумя видами работы, что можно выразить в следующей форме

$$\bar{\rho}_c u = A \gamma v i, \quad \delta = \frac{\gamma_r - \gamma}{\gamma}, \quad (1)$$

где $\bar{\rho}_c$ — объемное содержание (объемный вес) взвеси, или мутность потока,

u — гидравлическая крупность,

γ_r, γ — объемный вес частиц взвеси и воды,

v, i — скорость и уклон потока,

A — коэффициент пропорциональности.

Исключая уклон из уравнения (1), можно написать

$$\bar{\rho}_c = A_1 \frac{v^3}{Hu}, \quad (2)$$

если соблюдается, что

$$A_1 = \frac{A \gamma}{\gamma C^2}. \quad (3)$$

В реальных условиях, например, в оросительных каналах, величина скоростного множителя уменьшается, с уменьшением русла, до пяти раз. Коэффициент A_1 увеличивается, согласно (2) до 25 раз.

При небольших насыщениях и малых крупностях величина мутности следует приближенно уравнению (2) при постоянном значении A_1 и сильно отклоняется от уравнения (1). Отсюда можно высказать предположение о существовании лишь косвенной связи между указанными видами работы.

Анализ методов изучения режима взвешенных наносов и обработка результатов свидетельствуют о возможности больших отклонений от истинных значений в данных отдельных наблюдений мутности и крупности; величина ожидаемого среднеквадратичного отклонения от средних значений составляет около 10%. Кроме того, искомые критические условия взвешивания не всегда имеют место на практике, чаще встречаются режимы заиления или размыва. Происхождение достигнутого критического состояния — вследствие заиления или размыва несвязных отложений — также отражается на величине критической мутности, которая во втором случае в среднем на 30% меньше, чем в первом.

Отсюда вытекает, во-первых, необходимость опираться при выводах на средние данные по возможно большому числу опытных

точек, в которых отдельные отклонения будут сглажены. Во-вторых, для установления критических условий целесообразно использовать точки, не только соответствующие такому режиму, но и с заиляющим и размывающим режимами, корректирующие искомую закономерность. Поэтому все рассматриваемые данные наблюдений отнесены к одному из следующих трех условных режимов — заиляющему, критическому и размывающему. Критическим признается режим, полученный в результате как заиления, так и слабого размыва несвязных отложений. Установление заиляющего режима по данным наблюдений не представляет затруднений. Размывающим признается режим в том случае, если поток, будучи „недогружен“ наносами, может нести добавочное их количество в результате размыва ложа или подачи извне.

Опытные материалы о движении взвешенных наносов в оросительных каналах систематизированы путем сравнения данных с результатами подсчетов критического значения мутности по предварительно установленной формуле.

Приближенная расчетная формула для критической мутности в оросительных каналах, подтверждаемая многочисленными наблюдениями, имеет следующий вид:

$$\bar{\rho}_c = D_1 \frac{v^3}{Ru} = 0,018 \frac{v^3}{Ru} \text{ кг/м}^3. \quad (4)$$

Формула (4) подтверждена уточненными исследованиями, проведенными нами в малых земляных каналах в лабораторных и полевых условиях, и имеет, как увидим ниже, теоретическое основание.

В опытных данных, положенных в основу формулы (4), отмечалось преимущественно движение относительно мелких взвесей. Изучение вопроса о влиянии укрупнения состава на взвешивающую способность привело к необходимости введения в уравнение взвешивания коэффициента „крупности“ k :

$$\bar{\rho}_c = kD \frac{v^3}{Ru} = 0,02 k \frac{v^3}{Ru} \text{ кг/м}^3. \quad (5)$$

Величину коэффициента крупности, если средняя гидравлическая крупность взвеси подчиняется условию $\bar{u} \leq 0,003 v$, можно считать приблизительно равной 0,9 с приемлемой точностью, тогда из (5) получается формула (4). В общем же случае коэффициент крупности выражается следующим образом:

$$k = \left(\frac{u_0 - \bar{u}}{u_0} \right)^n \approx \left(\frac{0,08v - \bar{u}}{0,08v} \right)^4. \quad (6)$$

Здесь $u_0 \approx 0,08 v$ — условная наибольшая гидравлическая крупность частиц, взвешиваемых данным потоком.

Средняя гидравлическая крупность взвеси определяется обычно равенством

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \bar{u}_i}{100}, \quad (7)$$

а средняя гидравлическая крупность фракции — по одной из следующих формул

$$\bar{u}_i = \frac{u_i + u_{i+1} + \sqrt{u_i u_{i+1}}}{3}, \quad (8)$$

$$u_i = \frac{3u_i + u_{i+1}}{4}, \quad (9)$$

где u_i , u_{i+1} — соответственно низшая и высшая по крупности границы фракции.

Для крупных взвесей, содержащих более 25% фракций крупнее 2 мм/сек (приблизительно I и II фракции по Сабанину), лучше применять формулу (8), а для более мелких — (9).

Формулы (4—6) имеют силу для взвесей средней гидравлической крупности $\bar{u} > 0,0002$ м/сек. Наименьшая допустимая скорость течения в каналах вычисляется с помощью следующего опытного выражения:

$$v_0 = 0,3R^{\frac{1}{4}} \text{ м/сек.} \quad (10)$$

Опытной основой исследования послужили результаты наблюдений за режимом наносов в каналах, проведенных экспедициями САНИИРИ на оросительных системах Средней Азии, а также литературные данные [2, 6, 11, 12, 13, 15, 17]. Наблюдаемые гидравлические и наносные элементы заключаются в следующих пределах: расходы от 0,03 до 136 м³/сек, средние скорости течения — от 0,15 до 2,15 м/сек, средние мутности — от 0,5 до 84 кг/м³ и средние гидравлические крупности — от 0,17 до 14,1 мм/сек.

На рис. 1 приведены данные наблюдений за 1953 г. в специально построенном опытном поле в канале — отводе из магистрального канала Шават близ г. Ташауза. Абсциссы представляют замеренные, а ординаты — вычисленные значения скорости для критических режимов, достигнутых путем длительного прогона воды двумя путями:

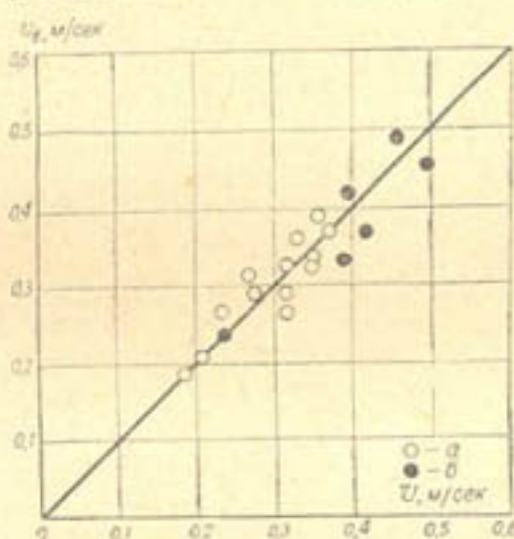


Рис. 1.

в результате незначительного заиления (а) и слабого размыва (б).

Принятая классификация опытных материалов облегчила задачу объективной оценки полученных формул и их числовых коэффициентов. Рассмотрены данные 513 наблюдений, из которых, в силу заранее принятых условий, исключено 37.

Сводные результаты анализа представлены в таблице, в которой, с разделением на режимы и объекты, даны значения средних отношений наблюдаемых мутностей и скоростей течения к вычисленным. Эти отношения для критических режимов близки к единице, что подтверждает правильность полученных уравнений.

Значения наблюдаемых мутностей находятся в следующих средних отношениях к расчетным: при заиляющих режимах — $1,12 \div 1,84$, критических — $0,84 \div 1,28$ и размывающих — $0,24 \div 0,82$. Соответствен-

но, средние отношения наблюдаемых скоростей к расчетным равны: $0,84 \div 0,99$, $0,95 \div 1,06$ и $1,18 \div 1,62$.

Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и вычисленными значениями скоростей течения при критических режимах оказался для всех десяти объектов с критическими режимами равным $0,93$, а для первых восьми объектов (исключая № 10 и 15) — $0,97$.

Отклонения наблюдаемых значений мутностей
и скоростей от расчетных

Номер объекта	Количество на- блюдений		$\frac{\sum p : p_{\text{в}}}{n}$	$\frac{\sum v : v_{\text{в}}}{n}$
	всего	принятых		
Затягивающие режимы				
4	91	86	1,84	0,84
5	55	45	1,51	0,90
6	10	10	1,51	0,90
7	15	15	1,61	0,87
8	6	4	1,57	0,88
9	5	5	1,41	0,90
10	23	23	1,12	0,99
12	17	17	1,73	0,86
13	3	3	1,29	0,92
15	16	15	1,82	0,84
Критические режимы				
1	17	12	0,90	1,05
2	14	13	1,14	0,97
2	6	6	0,88	1,06
3	31	23	1,28	0,95
4	33	33	1,22	0,97
8	5	5	0,91	1,03
10	48	47	0,84	1,12
14	19	14	0,90	1,04
15	31	29	1,15	0,95
16	1	1	1,13	0,96
Размывающие режимы				
3	4	4	0,34	1,22
4	1	1	0,31	1,48
8	2	2	0,39	1,38
9	10	9	0,65	1,18
10	15	15	0,52	1,29
11	18	18	0,59	1,26
13	4	4	0,24	1,62
15	13	13	0,82	1,07

Среднее отношение наблюдаемых мутностей к расчетным по всем точкам с критическими режимами составило $1,144$ и $1,067$ — соответственно при подсчетах по количеству наблюдений и количеству объектов. Таким образом, наблюдаемые мутности на $6,7 \div 14,4\%$ выше, а скорости — на $2,2 \div 4,6\%$ ниже вычисленных, что идет в „запас“ расчета.

Итак, полученные формулы достаточно хорошо подтверждаются многочисленными данными и могут быть рекомендованы как расчетные.

§ 2. ВЗВЕШИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОТКРЫТОГО ПОТОКА

Решение задачи о взвешивании в открытом водном потоке возможно на основании сложившихся к настоящему времени представлений о его структуре. В открытом потоке в результате трения о стенки возникает и поддерживается система крупномасштабных возмущений, ограниченных глубиной. Эти возмущения, распадаясь на вихри меньших масштабов, создают вместе с непрерывным вихреобразованием у стенок спектр пульсаций местной скорости различной частоты. Такое представление исходит из общего описания структуры турбулентности [8, 10, 18], которое в условиях водного потока ограниченной глубины дополняется естественным положением о доминирующей роли структурных крупномасштабных возмущений [3]. Существование крупномасштабных образований с размерами, близкими к глубине потока, подтверждается фактом постоянства числа Струхала для низкочастотных пульсаций скорости, а также визуальными наблюдениями.

Взвешивание тяжелых частиц потоком вызывается главным образом наличием в нем крупномасштабных пульсаций. Устойчивое содержание взвеси в потоке можно представить как следствие динамического равновесия, установившегося в результате подъема со дна (или придонной области) одних частиц, увлекаемых восходящими течениями, и опускания на дно (или в придонную область) других частиц. Для поддержания указанного обмена близ дна должен быть режим, при котором выпавшие частицы могут вновь подняться, что проявляется в подвижности отложений.

Данные опыта показывают, что крупномасштабные пульсационные составляющие скорости (вертикальные и продольные) в какой-то мере подчиняются закону нормального распределения. Из сказанного можно сделать вывод о наличии в потоке „восходящей“ и „нисходящей“ зон с приблизительно равным распределением скоростей: в первой происходит подъем, во второй — опускание частиц.

Рассмотрим обстановку близ дна потока. В нисходящей зоне давление повышается по отношению к среднему из-за торможения скорости и восстановления потенциальной энергии. В восходящей же зоне в придонной области оно в связи с отсосом соответственно понижается по сравнению со средним. Таким образом, в восходящей зоне существует относительный недостаток давления, который и является, по нашему мнению, основным фактором взвешивания тяжелых частиц турбулентным потоком.

В восходящей зоне происходит непрерывный подъем со дна насыщенных взвесью объемов воды, подбрасываемых в толщу потока придонными пульсациями, и их перемещение в сторону пониженных давлений. Насыщение взвесью этой зоны вызывает, в свою очередь, относительное повышение давления, обусловленное увеличением местной мутности и объемного веса. Уравновешивание дефицита давления в зоне повышенным давлением от взвеси и определяет критическое состояние потока в отношении взвешивания, или его взвешивающую способность.

Выясним условия равновесия для частиц с гидравлической крупностью n в придонном сечении отсека потока достаточной длины.

Протяженности восходящей и нисходящей зон в любом сечении отсека, параллельном дну, в том числе и в придонном, равны, а распределение вертикальных пульсационных скоростей в них подчиняется нормальному закону, отраженному на рис. 2. Восходящая зона здесь

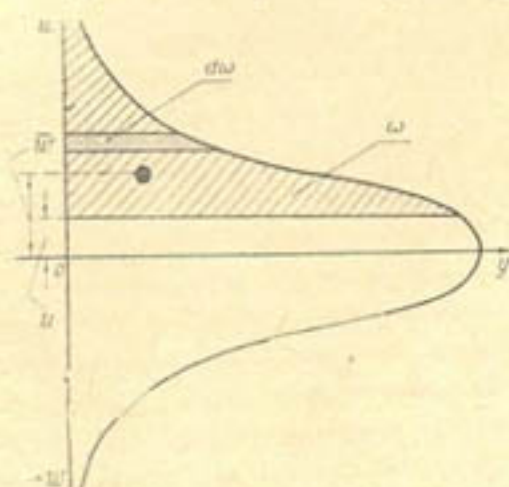


Рис. 2.

представлена областью, ограниченной кривой и осями координат выше оси y , а нисходящая — областью ниже оси y .

Уравнение кривой распределения имеет вид

$$y = \frac{1}{w_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{w^2}{2w_0^2}},$$

где w — вертикальная пульсационная скорость,

w_0 — ее дисперсия.

Элементарная площадка в нашем сечении с вертикальной скоростью w выразится следующим образом:

$$d\omega = ydw.$$

Обозначив через Φ_0 каждую из площадей, расположенных по разным сторонам от оси y , имеем

$$2\Phi_0 = \int_{-\infty}^{\infty} ydw = \frac{2}{w_0 \sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{w^2}{2w_0^2}} dw = 1, \quad \Phi_0 = 0,5.$$

Если на графике выше оси y провести прямую, соответствующую гидравлической крупности u , то площадь выше прямой (заштрихованная) представляет область $w > u$, в которой происходит подъем частиц, или область подъема ω , остальная же площадь, где $w < u$ — область опускания $1 - \omega$.

Очевидно,

$$\omega = \int_u^{\infty} ydw, \quad 1 - \omega = \int_{-\infty}^u ydw.$$

Введя обозначение для интеграла

$$\int_u^{\infty} ydw = \Phi$$

и полагая

$$x = \frac{w}{w_0}, \quad x_u = \frac{u}{w_0}, \quad dx = \frac{dw}{w_0}, \quad (11)$$

получим

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_u}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

Таким образом, величина $\Phi = \Phi(x)$ есть интеграл функции нормального распределения при аргументе x_u .

Для составления уравнения равновесия нужно выяснить, с одной стороны, относительный избыток давления в области подъема, вызванный повышенной здесь мутностью, с другой — дефицит давления в этой же области, связанный с системой восходящих и нисходящих токов. Условие равновесия определяется равенством вертикальных расходов взвеси в областях подъема и опускания частиц. Определим расход взвеси через сечение на любой высоте h от дна. Элементарный расход взвеси через площадку $u dw$ в области подъема будет

$$dq = \rho_n u (w - u) dw,$$

где ρ_n — объемное содержание взвеси или мутность в области подъема, $w - u$ — скорость подъема частиц через элементарную площадку.

Расход взвеси по всей области подъема составит

$$q_n = \int_u^\infty \rho_n u w dw - u \int_u^\infty \rho_n u dw.$$

Обозначив через $\bar{\rho}_n$, $\bar{w}$ среднюю мутность и среднюю вертикальную скорость по сечению в области подъема, после преобразований получим

$$\bar{w} = \frac{M(x)}{\omega} = \frac{\bar{w}_0 \varphi}{\Phi_0 - \Phi}, \quad (12)$$

где значения φ и Φ определяются из таблиц в курсах теории вероятностей при аргументе x , определенном по (11). Величина расхода выразится следующей формулой:

$$q_n = \bar{\rho}_n (\Phi_0 - \Phi) (\alpha_1 \bar{w} - u). \quad (13)$$

Для области опускания, охватывающей всю нисходящую зону и часть восходящей, где $w < u$, после преобразований и замен получим соответственно

$$q_n = \bar{\rho}_n [\alpha_1 \bar{w} (\Phi_0 - \Phi) + u (\Phi_0 + \Phi)]. \quad (14)$$

Коэффициент α_1 представляет собой отношение средних мутностей при различных формах осреднения.

Приравнивая расходы по (13) и (14), имеем

$$\bar{\rho}_n = \bar{\rho}_n \frac{(\Phi_0 - \Phi) (\alpha_1 \bar{w} - u)}{\alpha_1 \bar{w} (\Phi_0 - \Phi) + u (\Phi_0 + \Phi)},$$

или, введя вспомогательные обозначения

$$u_1 = \frac{u}{\alpha_1}, \quad \alpha = \frac{\Phi_0 + \Phi}{\Phi_0 - \Phi}$$

и переходя к средним мутностям по глубине, запишем

$$\left. \begin{aligned} \bar{\rho}_{в,с} &= \bar{\rho}_c \frac{\bar{w}_c + \sigma u}{\bar{w}_c} \\ \bar{\rho}_{н,с} &= \bar{\rho}_c \frac{\bar{w}_c - u_1}{\bar{w}_c} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Здесь $\bar{\rho}_{в,с}$, $\bar{\rho}_{н,с}$, $\bar{\rho}_c$ — уже средние мутности по глубине: в области подъема, опускания и средняя по отсеку, а $\bar{w}_c$ — средняя вертикальная скорость в области подъема.

Уравнения (15) показывают, что в области подъема мутность больше, чем в области опускания частиц. Необходимая величина относительного увеличения давления у дна в области подъема от повышенной здесь мутности будет равна облегченному в воде весу столба избыточной мутности

$$\Delta p = \delta H (\bar{\rho}_{в,с} - \bar{\rho}_{н,с}).$$

Используя уравнение (15), получим

$$\Delta p = \delta H \bar{\rho}_c \frac{u}{\alpha_1 \bar{w}_c (\Phi_0 - \Phi)}. \quad (16)$$

Переходя к определению относительного недостатка давления в придонном сечении в области подъема, следует учесть, что действующие здесь восходящие токи вызывают некоторое снижение давления по отношению к статистическому, нисходящие же, действующие преимущественно в области опускания, соответственно повышают местное давление. Будем считать, что среднее давление в каждой области изменится на величину, равную средней вертикальной кинетической энергии гидросмеси. Относительный дефицит давления получится в виде суммы недостатка среднего давления в области подъема и его избытка в области опускания частиц по отношению к среднему давлению по всему отсеку. Исходя из этих предпосылок, получим в окончательном виде выражение для дефицита давления

$$\Delta p_1 = \gamma' \frac{\bar{w}_x^2}{2g} \frac{1}{\Phi_0 - \Phi}, \quad (17)$$

где w_x — пульсационная вертикальная придонная скорость в восходящей области.

Величина γ' , представляя сложную функцию от нескольких переменных, зависят главным образом от объемного веса гидросмеси. При $u \ll \bar{w}_x$ будем иметь

$$\gamma' \approx \gamma + \delta \bar{\rho}_x = \gamma_{н,д}. \quad (18)$$

Здесь $\gamma_{н,д}$ — объемный вес гидросмеси в придонной области.

Приравнивая (16) и (17) в силу заранее принятого условия об уравнивании давлений, запишем

$$\bar{H} \bar{\rho}_c \frac{u}{\alpha_1 \bar{w}_c} \frac{1}{\phi_0 - \phi} = \gamma' \frac{\bar{w}_x^2}{2g} \frac{1}{\phi_0 + \phi}, \quad (19)$$

или, выделяя искомую величину и заменяя значения $\bar{w}_c$ и $\sqrt{\bar{w}_x^2}$ на $\bar{w}_{0,c}$, $\bar{w}_{0,x}$ — среднеквадратичные вертикальные пульсационные скорости в потоке, получим следующее выражение для мутности, введя еще коэффициент пропорциональности η ,

$$\bar{\rho}_c = \frac{\gamma' \alpha_1 \eta}{b} \frac{\bar{w}_{0,c} \bar{w}_{0,x}^2}{g H u}, \quad (20)$$

где

$$\gamma' \approx \gamma_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \approx 0,40, \quad \alpha_1 \approx 1.$$

Уравнение (20) показывает, что при заданных глубине потока и гидравлической крупности взвешивание определяется главным образом значениями вертикальной пульсационной скорости в потоке, а именно, среднеквадратичной скорости, осредненной по потоку $\bar{w}_{0,c}$, и среднеквадратичной скорости в придонном сечении $\bar{w}_{0,x}$.

Переход от вертикальных к средней скорости течения и некоторые допустимые приближения приводят к следующему уравнению для средней критической мутности потока:

$$\bar{\rho}_c = \gamma_n k \frac{\varphi_n}{b} \sigma_\tau^3 \frac{v^3}{g H^3 u}. \quad (21)$$

В данном уравнении содержится три новых коэффициента. Вместо гидравлической крупности u в уравнение (21) входит действительная скорость падения частиц, равная гидравлической крупности, помноженной на коэффициент стеснения β . Значения этого коэффициента, определенные Д. М. Минцем [9] для однородных взвесей, даны графически на рис. 3; эти же значения можно принять приближенно для смесей по средней гидравлической крупности. Как видим, при малых мутностях коэффициент β близок к единице.

Приведенный коэффициент среднеквадратичного отклонения вертикальной пульсационной скорости σ_τ связан с действительным коэффициентом уравнением

$$\sigma_\tau = \sigma_{0,x} \sqrt[3]{\eta}. \quad (22)$$

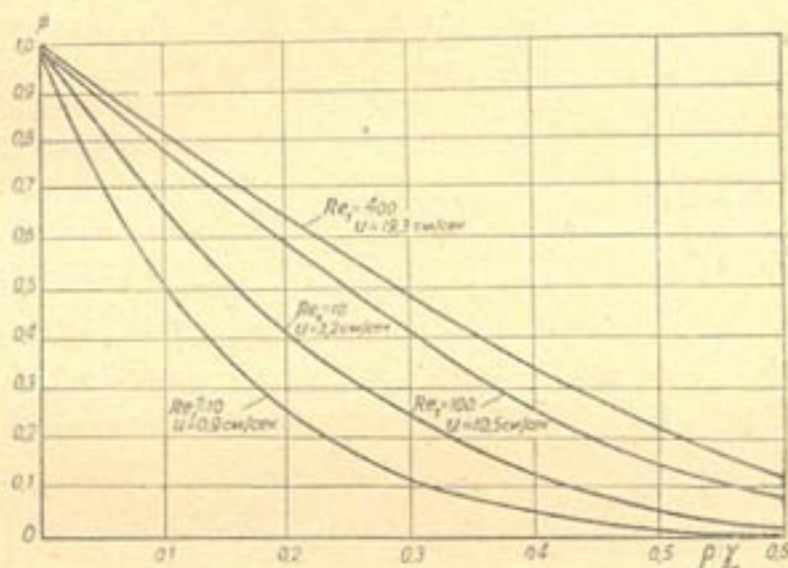


Рис. 3.

Наконец, „коэффициент крупности“ k отражает снижение мутности с увеличением гидравлической крупности; его выражение, данное в уравнении (9), получено с помощью дополнительной гипотезы о придонном режиме взвешивания.

В применении к реальным потокам глубина в уравнении (21) заменяется гидравлическим радиусом, а гидравлическая крупность частиц — средней гидравлической крупностью смеси. При малых значениях мутности и средней гидравлической крупности равенству (21) придается более простой вид (4) или (5), с учетом приблизительного постоянства отдельных коэффициентов, входящих в состав сводного коэффициента,

$$D = \gamma_n \frac{\tau_0}{\delta g} \sigma_r^3.$$

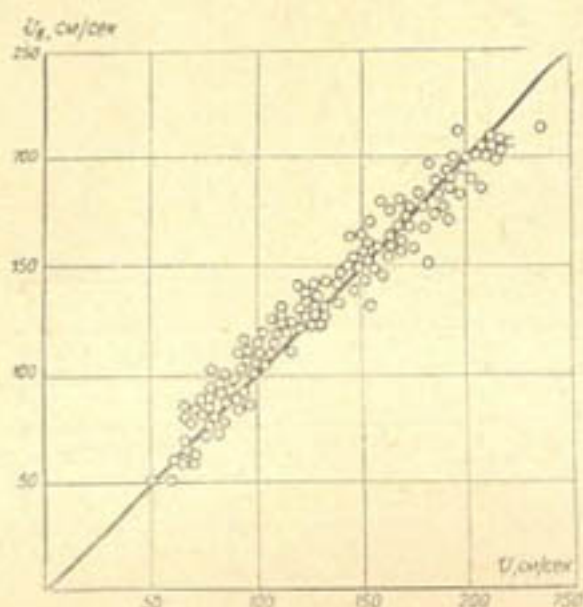


Рис. 4.

Правомерность формулы (21) при постоянном значении σ_r подтверждается также рассмотренными в работе опытными данными В. С. Кнороза (рис. 4) и Г. А. Тер-Абрамянца о движении пульпы в лотках в диапазоне мутностей от 0,5 до 592 кг/м³, поэтому его можно считать расчетным и для этого случая движения.

Для движения наносов в оросительных каналах величина σ_r получилась равной 0,068, а для движения пульпы в лотках — 0,086. Таким образом, считая в уравнении (22) коэффициент пропорциональности равным единице, имеем, что величина коэффициента средне-

квадратичного отклонения вертикальной пульсационной скорости, полученная таким косвенным путем, оказалась такого же порядка, что и измеренная непосредственно ($\sigma \approx 0,06 \div 0,08$). Это обстоятельство подтверждает реальность выдвинутой гипотезы взвешивания.

§ 3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГИДРОСМЕСЕЙ

Тяжелые частицы, взвешенные в потоке, в той или иной мере воздействуют на него, что внешне проявляется в изменениях гидравлических сопротивлений и распределения средних скоростей течения по глубине. Такое воздействие становится ощутимым и должно учитываться при транспорте пульпы с большими насыщениями.

Гидравлические сопротивления имеют важное значение в напорном гидротранспорте, в связи с чем в этой области накоплено значительное количество опытных данных и сделаны некоторые обобщения. Для русел же материалов подобного рода крайне мало. Поэтому здесь рассматриваются возможные принципиальные решения, могущие служить в приложениях лишь для ориентировочных расчетов впредь до накопления фактов и уточнения структуры формул и входящих в них параметров.

Данные о движении пульпы в трубах указывают, что гидравлические сопротивления для потоков, несущих взвеси, обычно больше,

чем для чистой воды. С увеличением средней скорости течения разница в сопротивлениях для гидросмеси и воды сокращается и при достаточно мелкой взвеси исчезает.

Гидравлические сопротивления для потоков гидросмесей очевидно, связаны с распределением мутностей и скоростей по глубине: мутности книзу растут, а скорость течения пульпы по отношению к скорости чистой воды уменьшается. Увеличение скорости приводит к выравниванию мутности по глубине; распределение скоростей по глубине приближается при этом к эпюре скоростей для воды.

Из гидравлики известно, что в выражении для уклона

$$i = \frac{\lambda}{K} \frac{v^2}{2g}$$

объемный вес жидкости отсутствует.

Из описанного явления, подтверждаемого наблюдениями в трубах и лотках следует, что при мелкой взвеси, равномерно распределенной по сечению благодаря большим скоростям течения, уклон и гидравлические сопротивления будут такими же, как и для потока воды. Таким образом, поведение гидросмеси в этом случае аналогично поведению однородной жидкости, но с иным объемным весом, а также вязкостью (условной), от которых гидравлические сопротивления в развитом турбулентном движении не зависят.

Описанное явление равенства гидравлических сопротивлений пульпы и воды установлено на основе собственных наблюдений В. С. Кнорозом [7] и А. П. Юфиным [14] и рассмотрено также М. А. Дементьевым [5]. Следует отметить, что это явление было замечено ранее еще Д. Я. Соколовым [16]. Исключение составляют такие гидросмеси, на движение которых воздействуют явления структурной вязкости и начальной скорости сдвига.

Характерно, что размеры частиц взвесей, для которых гидравлические сопротивления равны, представляют величину того же порядка, что и средняя приведенная высота выступов шероховатости стенок труб и лотков, где наблюдалось движение. Эта высота, по данным В. А. Мелентьева, для стальных труб, после 100—200 часов их нормальной эксплуатации, равна 0,15 мм, а для лотка В. С. Кнороза близка к 0,1 мм.

Наблюдения показывают, что при более крупной взвеси асимптотой на графике потерь напора служит уже не прямая линия для воды, а другая, приблизительно параллельная ей. При этом новая линия отстоит тем дальше от линии для воды, чем больше насыщение. При одинаковых же насыщениях линия асимптоты отдалается с увеличением крупности взвеси. В связи с этим можно предположить, что с возрастанием крупности взвеси появляется новый фактор гидравлических сопротивлений в виде повышенной фактической шероховатости стенок, возникающий в результате временной задержки или медленного влечения по дну частиц, значительно более крупных, чем приведенная высота выступов шероховатости самих стенок.

Укрупнение взвеси равносильно увеличению высоты выступов, а увеличение придонной мутности — более частому их размещению на поверхности стенки. Придонная мутность уменьшается от предельной, соответствующей наиболее плотному размещению зерен при критическом режиме, до средней с возрастанием скорости и выравниванием мутности по глубине.

Если же крупность частиц взвеси такого же порядка, что и выступы стенок, то гидравлические сопротивления не должны увеличиваться, как это и установлено опытами. Более того, если крупность взвеси значительно меньше, чем высота выступов стенок, то следует ожидать уже не повышения, а снижения гидравлических сопротивлений. Результаты наблюдений, приведенные в работе [1], подтверждают

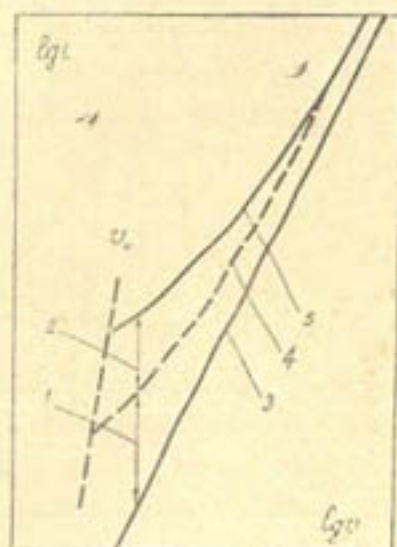


Рис. 5.

и это предположение. Первую форму влияния взвеси на гидравлические сопротивления через изменение трения на стенке можно учесть в виде дополнительного коэффициента сопротивления.

Мы упоминали предельные состояния движения взвеси, когда скорости течения настолько велики, что обеспечивается достаточно равномерное распределение взвеси по сечению. Рассматривая картину движения гидросмеси, можно убедиться, что с уменьшением скорости неравномерность распределения взвеси по глубине будет усиливаться вплоть до критического состояния, когда начнется выпадение частиц взвеси. Известно также, что равномерность распределения усиливается с увеличением гидравлической крупности частиц.

Можно предположить, что неравномерность распределения взвеси по глубине связана с усилением обмена частицами между толщей потока и его дном или придонной областью, в результате чего частицы, вступая вновь в толщу потока с пониженными скоростями, вызывают дополнительное, сверх обычных гидравлических сопротивлений, торможение потока. Этим определяется вторая форма воздействия взвеси на гидравлические сопротивления путем дополнительного торможения потока в результате учащенного обмена частицами между толщей потока и дном. Такая форма влияния скажется тем сильнее, чем больше содержание взвеси и чем чаще происходит обмен, характеризующийся неравномерностью распределения взвеси по глубине. С увеличением скорости и выравниванием распределения взвеси по глубине дополнительное торможение потока взвесью снижается вплоть до полного исчезновения. Рассмотренную форму воздействия также целесообразно учесть в виде дополнительного коэффициента сопротивления.

Материалы наблюдений дают основание считать, что изменения в гидравлических сопротивлениях при движении гидросмесей в обычной практике можно свести в основном к двум описанным формам влияния; другие же, рассматриваемые ниже формы, существенной роли в сопротивлениях не играют.

Изменения в гидравлических сопротивлениях, связанные с воздействием взвеси, иллюстрирует рис. 5. Отрезок 1 обозначает дополнительные сопротивления от повышенного трения на стенке, вызванного крупной взвесью, отрезок 2 — дополнительные сопротивления от торможения потока взвесью, линия 3 — сопротивления потока воды, 4 — сопротивления с учетом повышенного трения на стенке и 5 — суммарные сопротивления с учетом повышенного трения на стенке и торможения потока взвесью.

В литературе имеются указания на то, что наличие взвеси в потоке действует тормозящим образом на происходящие в нем

пульсационные движения, включая мелкомасштабные пульсации, в процессе которых осуществляется основной переход механической энергии в тепловую и ее рассеяние. Отсюда возникает предположение, что взвесь в потоке, вызывая снижение расхода энергии на пульсационные движения, соответственно уменьшает гидравлические сопротивления. Это подтверждается наблюдениями за движением газов. На основании критического разбора известных в этой области данных можно прийти, в согласии с А. Н. Колмогоровым, к выводу, что рассмотренный фактор ощутимо сказывается на гидравлических сопротивлениях лишь при очень больших насыщениях, редко встречающихся в практике.

Наконец, в литературе приводятся предположения о расходовании потоком энергии на подъем частиц и их поддержание во взвешенном состоянии — на так называемую „работу взвешивания“, упоминавшуюся ранее. Опытные данные убеждают в том, что и этот вид дополнительных сопротивлений практически несущественен.

Учитывая вышесказанное, для сводного коэффициента сопротивления приближенно будем иметь

$$\lambda_n \approx \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2, \quad (23)$$

где λ_0 — основной коэффициент сопротивления русла (при движении воды),

λ_1 — дополнительный коэффициент, вызванный изменением трения на стенке,

λ_2 — дополнительный коэффициент сопротивления от торможения потока тяжелой взвесью.

В результате анализа рассмотренных форм воздействия взвеси на поток мы получили следующие общие уравнения для дополнительных коэффициентов сопротивлений:

$$\lambda_1 = \left(\lambda_\Delta - \lambda \right) \left(\frac{s_x}{s_0} \right)^p, \quad (24)$$

$$\lambda_2 = \psi \frac{\bar{\rho}_c}{\gamma_n} \left(\frac{\beta u}{v} \right)^q \varepsilon^r. \quad (25)$$

Здесь λ_Δ — коэффициент сопротивления, соответствующий наиболее плотному размещению зерен у дна (при $v = v_k$),

s_x — придонная относительная мутность, определяемая приближенно уравнением

$$s_x = s + \varepsilon^m (s_0 - s), \quad m \approx 2,$$

$s_0 \approx 0,38$ — предельная относительная мутность при наиболее плотном размещении зерен,

$s = \bar{\rho}_c : \gamma_n$ — средняя относительная мутность,

$\varepsilon = v_k : v \leq 1$ — отношение действительной скорости к критической по условиям взвешивания.

Для предварительных расчетов могут служить следующие значения параметров:

$$\Delta = \frac{d}{2}, \quad p = 0,5, \quad \psi = 0,4, \quad q = 0,5, \quad r = 2.$$

Для связи коэффициента сопротивлений с приведенной высотой выступа шероховатости служит известная формула Зегжда-Никурадзе для квадратичного режима

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 4 \lg \frac{R}{\Delta} + 4,25. \quad (26)$$

Переход от основного коэффициента шероховатости к сводному осуществляется с помощью уравнения

$$n_n = n_0 \sqrt{\frac{\lambda_n}{\lambda_0}}. \quad (27)$$

Отметим, что в условиях безнапорного движения, когда, в отличие от напорного движения в трубах, уклоны (градиенты напора) не могут быть чрезмерно большими и соответственно невелика средняя крупность взвеси, коэффициенты сопротивлений при движении гидро-смеси обычно не намного выше (до полутора — двух раз), чем при движении воды.

§ 4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Расчеты незаиляемых оросительных каналов. Рассмотрим несколько простых задач, связанных с расчетами незаиляемых оросительных каналов. Пусть расчетная мутность воды, поступающей в систему из отстойника, равна 8 кг/м^3 , а средняя гидравлическая крупность взвешенных наносов $\bar{u} = 0,00063 \text{ м/сек}$. Определим условия незаиляемости для трех каналов системы со следующими данными:

$$\begin{array}{lll} Q_1 = 10 \text{ м}^3/\text{сек}, & R = 1,5 \text{ м}, & n = 0,020, \\ Q_2 = 1,0 \text{ м}^3/\text{сек}, & R = 0,7 \text{ м}, & n = 0,022, \\ Q_3 = 0,2 \text{ м}^3/\text{сек}, & R = 0,3 \text{ м}, & n = 0,025. \end{array}$$

Пользуясь формулой (5), имеем, полагая $k = 0,9$,

$$v_1 = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 8 \cdot 0,00063}{0,9 \cdot 0,020}} = 0,75 \text{ м/сек},$$

$$v_2 = 0,58 \text{ м/сек}, \quad v_3 = 0,44 \text{ м/сек}.$$

Уклоны каналов, необходимые для достижения указанных скоростей, получатся равными (считая по Маннингу)

$$i_1 = 0,00013, \quad i_2 = 0,00028, \quad i_3 = 0,00061.$$

В оросительных каналах потери воды, главным образом на фильтрацию, растут в процентах к расходу с уменьшением размера каналов. Требование недопущения заиления каналов с учетом потерь воды приводит к необходимости увеличения расчетной мутности в последующих звеньях каналов. В натурных наблюдениях, действительно, отмечается увеличение мутности воды вниз по системе при отсутствии явных признаков размыва или заиления, поэтому расчеты подобного рода вполне реальны.

В случае крупной взвеси необходимо учесть снижение коэффициента крупности. Для примера рассмотрим движение по транзитному тракту гидросмеси, полученной от промывки отстойника. Заданы: $\bar{\rho}_c = 20 \text{ кг/м}^3$, $\bar{u} = 0,010 \text{ м/сек}$, $R = 1,0 \text{ м}$. Подбором получается, при $k = 0,80$,

$$v = \sqrt[3]{\frac{20 \cdot 1 \cdot 0,010}{0,80 \cdot 0,02}} = 2,30 \text{ м/сек}.$$

Действительно,

$$k = \left(\frac{0,08 \cdot 2,30 - 0,010}{0,08 \cdot 2,30} \right)^4 = 0,80.$$

Необходимый уклон для тракта при $n = 0,020$ будет $i \approx 0,0021$. Такие скорости и уклоны для временных транзитных трактов в земляных руслах допустимы: примером может служить опыт промывки на объекте № 16, где достигались скорости около $2,2 \text{ м/сек}$.

Располагая общим падением местности от головного участка до мелкой сети, пользуясь формулой для критической скорости, можно решать задачи проектирования каналов системы с заданными объемами или полным отсутствием заиления и устанавливать задание для проектируемых отстойников.

В новых или переустраиваемых системах не всегда целесообразно стремиться к полной незаиляемости каналов. Более надежна их работа при режиме незначительного заиления, чем при размыве: ежегодные подчистки и выправления русел земляных каналов с одновременным удалением растительности связаны с восстановлением их пропускной способности независимо от заиления и обычно неизбежны.

При регулировании режима наносов по системе следует учесть влияние планового расположения головных сооружений отводов по отношению к главному каналу. При боковом водозаборе усиливается относительный забор придонных слоев воды с повышенным содержанием более крупной взвеси. В практике известны случаи усиленной заиляемости головных участков отдельных отводов, вызванной неблагоприятным водозабором.

Вопрос об устойчивой форме поперечного сечения крупного канала и, главным образом, о соотношении его ширины и глубины, связан с комплексом факторов, выходящих за рамки нашей темы. Рассматривая задачу лишь с точки зрения транспортирующей способности канала, перепишем формулу для критической мутности, заменив скорость через уклон

$$\bar{\rho}_c = \frac{D}{un^3} R^{0,5+3y} i^{1,5}$$

или, по Маннингу,

$$\bar{\rho}_c = \frac{D}{un^3} Ri^{1,5}.$$

При постоянных значениях уклона и коэффициентов D , $\bar{u}$ и n критическая мутность растет пропорционально гидравлическому радиусу. Таким образом, в более глубоких каналах взвешивающая способность выше. Это положение имеет, по-видимому, ограниченную силу в связи с некоторой условностью замены глубины гидравлическим ра-

диусом в исходных уравнениях и несовершенством обычных формул гидравлики в применении к крупным земляным каналам, подверженным русловым деформациям.

При устройстве каналов в облицовке необходимо обеспечить полную незаиляемость. Режим их работы приближается к условиям движения гидросмеси в лотках. Коэффициент D в формуле (5) для таких каналов будет, очевидно, занимать промежуточное положение между земляными каналами, где $D = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$, и лотками, где $D \approx 0,04 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$. По отдельным данным о работе пульповодов на Чирчикстрое, величину этого коэффициента для бетонированных каналов можно принять равной $0,026 \div 0,030 \text{ кг} \cdot \text{сек}^2/\text{м}^4$.

Решение задачи коренной реконструкции оросительных систем связано с устройством оросительных каналов (или лотков) в бетонной облицовке. Выясним влияние этого мероприятия на режим наносов в системе. Скорости в каналах при тех же уклонах увеличатся по сравнению с земляными на 30%; примерно на столько же уменьшатся их гидравлические радиусы. Коэффициент D примем на 40% выше, чем в земляных каналах. Обозначив элементы потоков в новых условиях индексами, будем иметь

$$v_1 = 1,3v, \quad R_1 = \frac{R}{1,3}, \quad D_1 = 1,4D.$$

Величина критической мутности в новых условиях составит

$$\bar{p}_{1,c} = kD_1 \frac{v_1^3}{R_1 u} \approx 4\bar{p}_c.$$

Таким образом, транспортирующая способность оросительной системы с каналами в бетонной облицовке оказывается в четыре раза выше, чем у земляных каналов. Разумеется, этот расчет грубо ориентировочный, но он показывает, что при реконструкции систем будет попутно решена задача транспортирования взвешенных в воде источника наносов на поля, что представляет собой наиболее радикальное решение задачи борьбы с наносами в системах среднего и нижнего течения Аму-Дарьи, где эта проблема стоит наиболее остро.

Выбор данных для расчетов транспортирующей способности оросительных каналов должен основываться на материалах о режиме взвешенных наносов в реке и режиме работы оросительной системы. В таких расчетах не следует ограничиваться предельными случаями, например, рассчитывать канал при максимальном расходе, наибольших наблюдаемых значениях мутности и средней гидравлической крупности. Необходимо рассмотреть несколько типичных случаев, характеризующих работу каналов системы в процессе эксплуатации.

Следует учесть, что максимумы значений расхода канала, мутности и средней гидравлической крупности, как правило, не совпадают, а в реках, кроме того, наблюдается снижение средней гидравлической крупности взвешенных наносов с увеличением мутности.

Для предварительных расчетов можно ограничиться проверкой транспортирующей способности при одном сочетании элементов, например, при максимальном расходе (без форсировки), наибольшей декадной мутности среднего года и средней за поливной период гидравлической крупности.

Расчеты открытых пульповодов. Гидротранспорт в лотках находит применение в различных областях народного хозяйства

и, в частности, на строительстве, примером чего могут служить работы на строительстве гидростанций и ирригационных объектов военного и послевоенного периода в Узбекской и Таджикской ССР. Упорядочение расчета открытых пульповодов, несомненно, будет содействовать развитию этого дешевого вида транспорта.

Для примера произведем расчет лотка для транспорта пульпы из лессового грунта, расходом 300 л/сек, средним насыщением в весовом отношении твердой компоненты к жидкой $1:K=1:4$. Состав грунта: менее 2 мм/сек ($d \leq 0,05$ мм) — 80%, от 2 до 27 мм/сек ($0,05 \leq d \leq 0,25$ мм) — 19% и от 27 до 50 мм/сек — 1%. Средняя гидравлическая крупность равна 3,2 мм/сек. Кроме того, в грунте имеются включения галечника и камня размерами до 10 см.

Величину мутности получим с помощью уравнения

$$\overline{\rho_c} = \frac{\gamma_r}{\frac{\gamma_r}{\gamma} K + 1} \quad (28)$$

При $\gamma_r = 2700$ кг/м³, $\beta = 0,63$ будет

$$\overline{\rho_c} = \frac{2700}{2,7 \cdot 4 + 1} = 219 \text{ кг/м}^3, \quad s = \frac{219}{2700} = 0,081,$$

$$\gamma_n = \gamma + \beta \overline{\rho_c} = 1000 + 0,63 \cdot 219 = 1138 \text{ кг/м}^3.$$

Согласно графику на рис. 3 имеем $\beta = 0,56$.

Задав предварительно значениями $R = 0,15$ м, $k = 0,9$, вычислим необходимую критическую скорость по формуле (21) при $\sigma_r = 0,086$

$$v_k = \frac{1}{\sigma_r} \sqrt[3]{\frac{\overline{\rho_c}}{\gamma_n} \frac{\beta g R \beta u}{k \gamma_0}} = 1,04 \text{ м/сек.}$$

Коэффициент шероховатости для лотка из строганных досок равен $n_0 = 0,013$. Зададимся $n = 0,015$. Необходимый уклон при этом (по Маннингу) выразится так:

$$i = \frac{v^2 n^2}{R^{\frac{4}{3}}} = \frac{1,04^2 \cdot 0,015^2}{0,15^{\frac{4}{3}}} = 0,00305.$$

Скорость, необходимая для влечения наибольших включений, будет равна, по В. Н. Гончарову [4, стр. 283]

$$v_c = \lg \frac{8,8 R}{d_{\max}} \sqrt{\frac{2g(\gamma_r - \gamma) d_{\max}}{1,75 \gamma}} = 1,57 \text{ м/сек.}$$

Для обеспечения этой скорости придется повысить уклон лотка до величины

$$i = \frac{1,57^2 \cdot 0,015^2}{0,15^{\frac{4}{3}}} \approx 0,007.$$

Необходимому живому сечению $0,3:1,61=0,191 \text{ м}^2$, удовлетворяет лоток, шириной $0,55 \text{ м}$, глубиной воды $0,35 \text{ м}$ и гидравлическим радиусом $R=0,15 \text{ м}$.

Для учета возможных гидравлических сопротивлений положим среднюю крупность придонных частиц $d_c=0,2 \text{ мм}$, соответственно $\Delta=0,5d_c \approx 0,1 \text{ мм}$. Эта высота примерно равна приведенной высоте выступов шероховатости стенки, поэтому дополнительные сопротивления могут быть лишь от торможения потока взвесью; определим их по формуле (25)

$$\lambda_2 = 0,4 \frac{219}{1138} \left(\frac{0,56 \cdot 0,0032}{1,57} \right)^{0,5} \frac{1,04}{1,57} = 0,0017.$$

Основной коэффициент сопротивления равен, по Маннингу,

$$\lambda_0 = \frac{2gn^2}{R^3} = 0,0063.$$

Общий коэффициент сопротивления составит $\lambda_n = \lambda_0 + \lambda_2 = 0,0080$, чему соответствует, согласно (27), коэффициент шероховатости, принятый предварительно

$$n_n = 0,013 \sqrt{\frac{0,0080}{0,0063}} \approx 0,015.$$

Из-за отсутствия данных в расчете не учтены дополнительные сопротивления от крупных включений. Судя по опыту работы на Чирчикстрое, там при значительном количестве крупных включений (примерно до 1—1,5% от общего веса) возможное повышение коэффициента шероховатости составило не более 20%.

Дополнительные сопротивления могут оказаться значительными при движении крупной взвеси в гладких лотках. Такие случаи в практике встречаются редко.

Лотковые пульповоды могут быть эффективно применены в ирригации для упорядочения очистки в головных участках магистральных каналов. В настоящее время их очистка производится землесосными снарядами с выбросом пульпы в береговые отвалы на значительном протяжении. Большая высота отвалов, достигающая десяти и выше метров, затрудняет продолжение очистки и поддержание каналов, поэтому приходится иногда идти на оставление старых и прорытие новых головных участков. В этом случае на головном участке магистрального канала возможно устройство отстойника небольшой длины, оборудованного системой лотков для приема и сброса пульпы в реку. Такой метод удаления пульпы дешевле, чем в напорных трубах и при нем устраняется опасность перебоев в работе вследствие забивки труб.

Например, в условиях систем нижнего течения Аму-Дарьи, при мутности пульпы $150-200 \text{ кг/м}^3$ и средней гидравлической крупности песка 15 мм/сек необходимые уклоны лотков будут около одной сотой. В этом случае с помощью лотков может быть организовано удаление пульпы в реку с отстойника на головном участке длиной $800-1000 \text{ м}$ при удалении канала от берега реки на расстояние до 400 м без дополнительной перекачки. Примерная схема расположения лотков показана на рис. 6. Увеличение длины отстойника и расстоя-

ния до реки повлечет необходимость устройства перекачной (бустерной) станции.

Дополнительные расходы по удалению пульпы указанным способом вполне окупаются облегчением эксплуатации оросительных каналов по сравнению с существующим положением. Такой же способ размещения пульпы в наиболее удобные для этого места может быть применен и для внутрисистемных отстойников.

Лотки для указанных целей целесообразно устраивать сборными: из дерева, железа или железобетона, с системой стоек для эстакад — в качестве инвентарного оборудования.

В этом случае облегчается регулирование хвостовой части пульпосброса путем наращивания или уборки звеньев лотка.

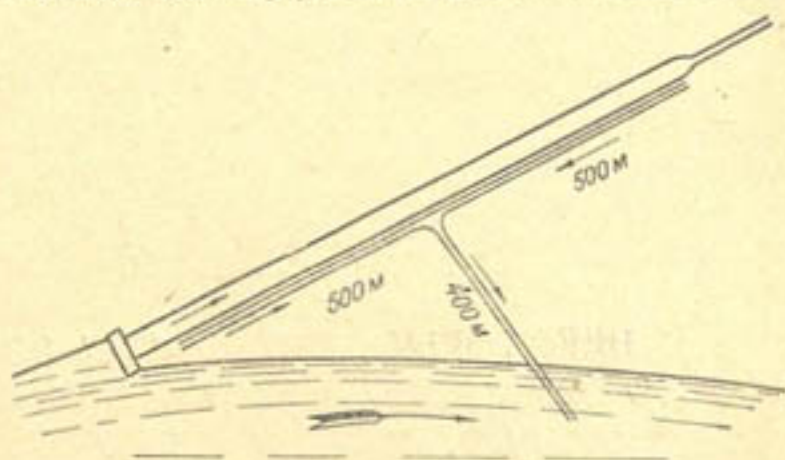


Рис. 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абальянц С. Х. Движение взвесей в открытых потоках, Труды САНИИРИ, вып. 96, Ташкент, 1958.
2. Абальянц С. Х. О транспортирующей способности каналов системы „Народная победа“ на р. Хуанхэ, Труды САНИИРИ, вып. 89, Ташкент, 1957.
3. Великанов М. А. Динамика русловых потоков, М., Гидрометеониздат, 1949.
4. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков, Л., Гидрометеониздат, 1954.
5. Деметьев М. А. Опыт построения основ расчета гидротранспорта, „Изв. ВНИИГ“, 1948, т. 36, 38.
6. Замарин Е. А., Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах, М., Госстройиздат, 1951.
7. Кнороз В. С. Безнапорный гидротранспорт и его расчет, „Изв. ВНИИГ“, 1951, т. 44.
8. Колмогоров А. Н. О новом варианте гравитационной теории движения взвешенных наносов М. А. Великанова, Вестник Московского университета, сер. физ.-мат. и ест. наук, 1954, № 3.
9. Минц Д. М. О скорости стесненного падения твердых частиц в жидкости, „Гидротехническое строительство“, 1953, № 5.
10. Обухов А. М. К теории атмосферной турбулентности, „Изв. АН СССР“, сер. физ., 1942, № 1—2.
11. Пышкин Б. А. и Федоров Е. П. Результаты изучения взвешенных наносов в каналах Азизбековской ирригационной системы, Бюллетень № 7, Зак. НИИВХ, Тбилиси, 1931.
12. Хачатрян А. Г. Борьба с заилием оросительных каналов, М., Сельхозгиз, 1948.
13. Хачатрян А. Г. Отстойники на оросительных системах, М., Сельхозгиз, 1957.
14. Юфин А. П. Напорный гидротранспорт, М., Госэнергоиздат, 1950.
15. Яковлев И. С. Транспортирующая способность аму-дарьинских оросительных систем, Кандидатская диссертация, М., ВНИИГИМ, 1953.
16. Sokoloff D., Hydraulischer Erdtransport, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 1934, № 10.
17. Fortier S. and Blaney H. Silt in the Colorado river and relation to irrigation, New York, 1928.
18. Richardson I. Weather prediction by numerical process, Cambr. Univ. Proceedings, 1922.

В. С. ЛАПШЕНКОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
ПО ЗАИЛЕНИЮ И ЗАНЕСЕНИЮ ПОДПЕРТЫХ БЬЕФОВ
ГИДРОУЗЛОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА РЕКАХ УЗБЕКИСТАНА

Возведение гидроузлов на реках и образование подпертых бьефов и водохранилищ значительно изменяют бытовой режим твердого стока: после создания подпора на реке и резкого уменьшения скоростей течения наносы некоторое время задерживаются в подпертых бьефах гидроузлов. В условиях рек Узбекистана, отличающихся большим твердым стоком, вопросы прогноза заиления и занесения верхних бьефов гидроузлов имеют большое народнохозяйственное значение. Важнейшие характеристики такого прогноза — объем и срок аккумуляции наносов.

Изучение литературных данных по заилению и занесению верхних бьефов гидроузлов (работы С. Т. Алтунина, А. Н. Гостунского, Г. И. Шамова, И. И. Леви, В. Н. Гончарова, И. А. Бузунова и др.), а также анализ материалов натурных исследований существующих гидроузлов позволили автору разработать метод расчета объемов и сроков аккумуляции наносов в подпертых бьефах. Расчеты производились по формуле (1), в основу которой положена линейная зависимость количества выносимых из подпертого бьефа наносов от объема заиления и занесения

$$V = V_n \left(1 - e^{-\frac{t}{E}} \right). \quad (1)$$

Здесь V — объем наносов, отложившихся в подпертом бьефе за время t ,
 V_n — предельный объем аккумуляции наносов; он равен полному объему подпертого бьефа, определяемому из условий транспортирования через бьеф всех бытовых наносов реки, без объема русла на участке подпора,
 e — основание натуральных логарифмов,
 E — характеристика наносоаккумулирующей способности бьефа

$$E = \frac{V_n}{\varepsilon' G},$$

где G — годовой сток наносов,
 ε' — доля осаждения наносов в подпертом бьефе в начале эксплуатации его,

$$\varepsilon' = \frac{s_0 - s'}{s_0}$$

s_0 — насыщение потока наносами в бытовых условиях,

s' — насыщение наносами потока, проходящего через створ плотины в начале эксплуатации бьефа.

Вывод формулы (1) приводится в работе [1].

К сожалению, полными данными, необходимыми для проверки предлагаемого метода прогноза, мы располагаем не по всем существующим гидроузлам. Так, например, по Кампыр-Раватскому подпертому бьефу мы не имеем сведений о предельно заносимом объеме и доле осаждения наносов в начале эксплуатации; по Сары-Курганскому бьефу также неизвестна доля первоначального осаждения и т. п. Поэтому некоторые отсутствующие данные были получены нами путем расчетов.

Зайление Фархадского подпертого бьефа [2, 3, 4]. Предельно заиляемый объем подпертого бьефа равен $238 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. В начальный момент эксплуатации в нижний бьеф проходило 5% наносов. При среднемноголетнем стоке взвешенных наносов в р. Сыр-Дарье у ст. Запорожской $32 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$ характеристика заиляемости подпертого бьефа равна

$$E = \frac{238 \cdot 10^6}{0,95 \cdot 32 \cdot 10^6} = 7,83 \text{ года}$$

(донные наносы составляют примерно 2% от стока взвешенных и в расчете не учтены).

Во время строительства плотины горизонт воды в верхнем бьефе был выше бытового, вследствие чего в нем к 1948 г., по данным С. Т. Алтунина, осело $46 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ наносов. Время, в течение которого эти наносы осели бы при проектной отметке подпертого горизонта воды, определено по формуле (1) и равно 1,68 года. Объемы зайления, вычисленные по указанной формуле, приводятся ниже.

Год	t , лет	Объем зайления, млн. м^3	
		вычисленный	фактический
1947	1,68	46,0	46,0
1948	2,68	69,0	60,3
1949	3,68	89,2	83,3
1950	4,68	107,0	104,4
1951	5,68	122,5	126,5
1952	6,68	136,4	171,5
1953	7,68	148,4	182,4
1954	8,68	159,0	—
1955	9,68	168,6	224,3
1956	10,68	178,0	—

По этим результатам на рис. 1а построена кривая зайления. Там же приведены данные о фактических объемах зайления.

При сравнении фактических величин с вычисленными по среднемноголетним характеристикам стока р. Сыр-Дарьи следует учесть, что в 1952 и 1953 гг. отмечалось значительное превышение нормы стока воды и наносов.

Зайление подпертого бьефа на канале Бозсу [5]. Горизонт воды поднят до проектной отметки в январе 1926 г. Объем бьефа — $1,66 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, предельно заиляемый объем, по данным А. С. Вавилова, — $1,39 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. В начале эксплуатации осаждались все наносы, сток их, по Ю. К. Давыдову (0,04% от стока воды), равен $0,3 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}$.

В этом случае характеристика заиляемости равна

$$E = \frac{1,39 \cdot 10^6}{1,0 \cdot 0,3 \cdot 10^6} = 4,63 \text{ года}.$$

Ниже помещены результаты вычислений.

Год	t, лет	Объем заиления, млн. м ³	
		вычисленный	фактический
1926	1	0,272	—
1927	2	0,484	—
1928	3	0,670	—
1929	4	0,800	0,816
1930	5	0,918	—
1931	6	1,00	—
1932	7	1,08	—
1933	8	1,14	0,962

На рис. 16 приведены результаты вычислений полевых исследований в декабре 1929 и апреле 1933 гг. (в 1933 г. из 6 км подпертого бьефа промеряли лишь нижний участок его длиной 2,75 км, что объясняет некоторую разницу в объемах — примерно 0,1 млн. м³). Там же представлены данные, полученные по уравнению А. С. Вавилова, исследовавшего заиление Бозсуйского подпертого бьефа в 1933 г.

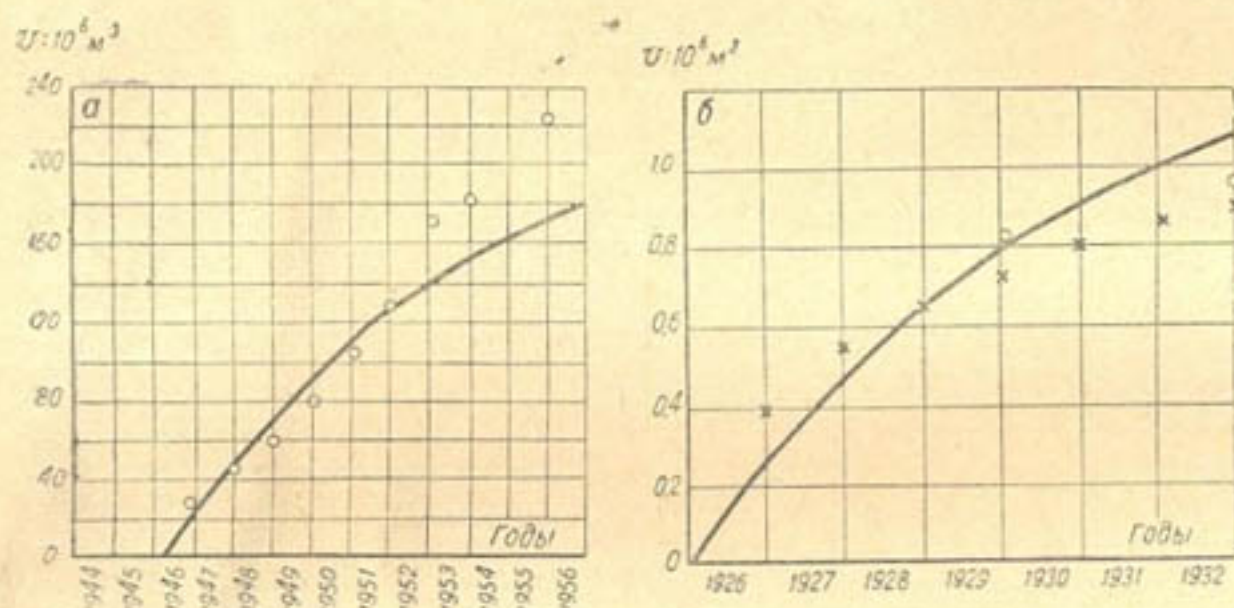


Рис. 1. Увеличение объема заиления:

а — Фархадского подпертого бьефа; б — Бозсуйского водохранилища.
1 — при расчете по среднемуголетним характеристикам стока; 2 — данные
натурных исследований; 3 — по вычислениям А. С. Вавилова.

Занесение Сары-Курганского подпертого бьефа на р. Сох [6]. На участке подпертого бьефа река разделялась на несколько рукавов, расположенных в пойме средней ширины (450 м). Уклон главного русла был 0,008, уклон поймы — 0,010. Расходы воды изменялись от 6 до 251 м³/сек. Наибольший диаметр булыг, участвующих в руслообразующих процессах, — 32×19×14 см (1936 г.) и 29×20×17 см (1948 г.), т. е. средний диаметр — 22 см.

Строительство гидроузла было завершено в 1947 г. На плотине поддерживается напор 2,0—2,7 м. За период работы гидроузла с 1948 по 1954 гг. среднемесячные расходы почти ежегодно (кроме 1951 г.) превышали 150 м³/сек, поэтому указанная величина принята за руслообразующий расчетный расход. Прохождение мелких фракций донных наносов в нижний бьеф отмечено уже в 1948 г. Они транспортировались при расходах воды в реке до 170 м³/сек при уклоне подводящего русла 0,0018. Следовательно, это были песчано-гравелистые наносы, составляющие примерно 20% от годового стока. Предельно заносимый объем подпертого бьефа будет

$$V_n = \frac{2,5 \cdot 450 \cdot 2500}{2} - 135\,000 = 1,26 \cdot 10^6 \text{ м}^3,$$

где 135 тыс. м³ являются объемом русла при предельной длине кривой подпора — 2500 м. При среднегодовом стоке донных наносов $115 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$ характеристика занесения равна

$$E = \frac{1,26 \cdot 10^6}{0,8 \cdot 115 \cdot 10^3} = 13,7 \text{ года}.$$

Приводим результаты вычислений объемов занесения.

Год	t, лет	Объем занесения, тыс. м ³	
		вычисленный	фактический
1948	1	88,1	42,0
1949	2	170	176,4
1950	3	246	224,0
1953	6	448	228,9
1954	7	500	488,4
1958	10	652	—
1962	15	838	—

На рис. 2а приводятся результаты определения фактических объемов занесения, а также вычислений автора.

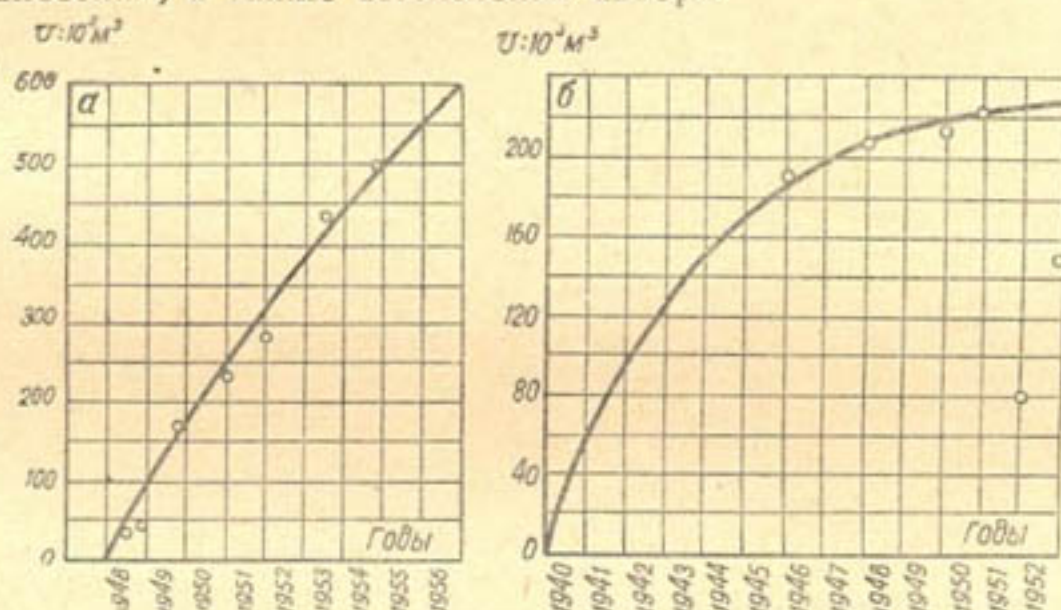


Рис. 2. Изменение объема занесения в подпертом бьефе:
а — Сары-Курганского; б — Кампыр-Раватского.
1 — расчетная кривая; 2 — данные полевых исследований.

Занесение подпертого бьефа Кампыр-Раватского водного узла на р. Кара-Дарье. В нормальную эксплуатацию подпертый бьеф КРВУ вступил в 1940 г. Подпор горизонта воды у плотины в межень составляет 3 м. Сток донных наносов в Кара-Дарье изменялся в пределах от 100 тыс. м³/год (1935 г.) до 1,5 млн. м³/год (1936 г.). Средняя величина стока донных наносов в Кара-Дарье за 1940—1949 гг. — 150 тыс. м³/год. В начале эксплуатации в нижний бьеф плотины приносились гравелистые и даже галечниковые наносы.

Объемы занесения подпертого бьефа, по данным Ф. Ш. Ишаева, приводим в табл. 1.

Характеристика заносимости, определенная по результатам измерения объемов занесения в 1945 и 1948 гг., равна 4,1 года, предельно заносимый объем бьефа — 241 тыс. м³.

Вычисленные объемы занесения подпертого бьефа за другие годы приведены на рис. 26. и ниже

Год	t, лет	Объем занесения, тыс. м³	
		вычисленный	фактический
1940	1	52,1	—
1941	2	92,8	—
1942	3	125	—
1944	5	169	—
1945	6	185	188
1947	8	207	—
1948	9	215	207
1949	10	220	210
1950	11	224	214
1951	12	228	80
1952	13	231	150

При сравнении этих данных с фактическими видно, что две последние точки (за 1951 и 1952 гг.) не совпадают с расчетной кривой, что объясняется проведением промывов бьефа.

Таблица 1

Год	Длина отложения, м	Объем отложения, тыс. м³	Примечание
1945	1500	188	По данным отчета за 1950 г.
1948	1500	207	По съемке в феврале 1948 г.
1949	1700	210	—
1950	1700	224	—
1951	1700	80	Производился промыв
1952	1700	150	—

Аккумуляция наносов в Газалкентском подпертом бьефе на р. Чирчик [2]. Газалкентский гидроузел с напором в 6,5 м начал эксплуатироваться в конце 1939 г. Объем подпертого бьефа—1,8 млн. м³, длина—1800 м. В первые три года в нем осаждались донные и взвешенные наносы (песчаные фракции), в последние происходило занесение только донными. По проработкам САОГИДЭП для Чарвакской ГЭС приняты следующие среднегодовые величины стока наносов: взвешен-

ных—1,2 млн. м³/год, донных—128 тыс. м³/год.

З а и л е н и е. При среднепаводковом расходе р. Чирчик 660 м³/сек и скорости потока 0,825 м³/сек, при которой прекращается заиление, объем русла будет равен $800 \cdot 1800 = 1,44$ млн. м³. Следовательно, предельно заиляемый объем бьефа— $(1,8 - 1,44) \cdot 10^6 = 0,36$ млн. м³. В начале эксплуатации в подпертом бьефе, по данным С. Т. Алтунина, осаждалось 40% взвешенных наносов. При указанных цифрах характеристика заиляемости его составляет

$$E = \frac{360 \cdot 10^3}{0,4 \cdot 1200 \cdot 10^3} = 0,75 \text{ года.}$$

Ниже помещены вычисленные объемы заиления.

Год	t, лет	Объем заиления, млн. м³	
		вычисленный	фактический
1940	1	0,265	—
1941	2	0,335	—
1942	3	0,353	0,340

В конце 1942 г. к плотине подошли мелкие донные наносы. С этого времени часть их ежегодно выносятся из подпертого бьефа.

Занесение. Предельно заносимый объем подпертого бьефа равен $1,635 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Он определен из условия транспортирования по

Таблица 2

Год	t, лет	Вычисленный объем аккумуляции, тыс. м^3			Фактический объем аккумуляции наносов, тыс. м^3		
		заиления	занесения	суммарный	на участке от плотины до поперечника № 20	на участке выше поперечника № 20	суммарный
1941	1,95	330	250	580	600	0	600
1942	2,7	354	346	700	725	0	725
1944	4,4	360	570	930	875	30	905
1945	6,0	360	740	1100	1050	50	1100
1946	6,7	360	810	1170	1070	60	1130
1947	7,9	360	922	1282	1200	80	1280
1948	9,0	360	1015	1375	1275	95	1370
1950	10,9	360	1152	1512	1400	118	1518
1952	12,8	360	1270	1630	1510	137	1647
1953	13,9	360	1330	1690	1510	158	1668

бьефу булыг размером 200 мм при расходе воды $1000 \text{ м}^3/\text{сек}$. Здесь 200 мм — диаметр булыг, более которого в составе донных наносов содержится 5%, $1000 \text{ м}^3/\text{сек}$ соответствует руслоформирующему расходу р. Чирчик. В первые три года донные наносы задерживались в подпертом бьефе полностью, поэтому доля осаждения их принимается $\varepsilon' = 1,0$. Характеристика заносимости будет

$$E = \frac{1,635 \cdot 10^6}{1,128 \cdot 10^5} = 12,75 \text{ года.}$$

Результаты вычисления объемов занесения Газалкентского подпертого бьефа приводятся в табл. 2.

Вследствие того, что промеры по длине подпертого бьефа производились по участкам не одновременно, фактические данные о занесении представлены (на рис. 3) двумя кривыми: z — увеличение объема занесения участка от плотины до поперечника № 20, δ — участок выше поперечника № 20. Разность ординат между кривыми a и z как раз равна ординатам δ .

Приведенные в настоящей статье данные о заиления и занесении верхних бьефов существующих гидроузлов и результаты, полученные по нашей расчетной зависимости, свидетельствуют о том, что эта

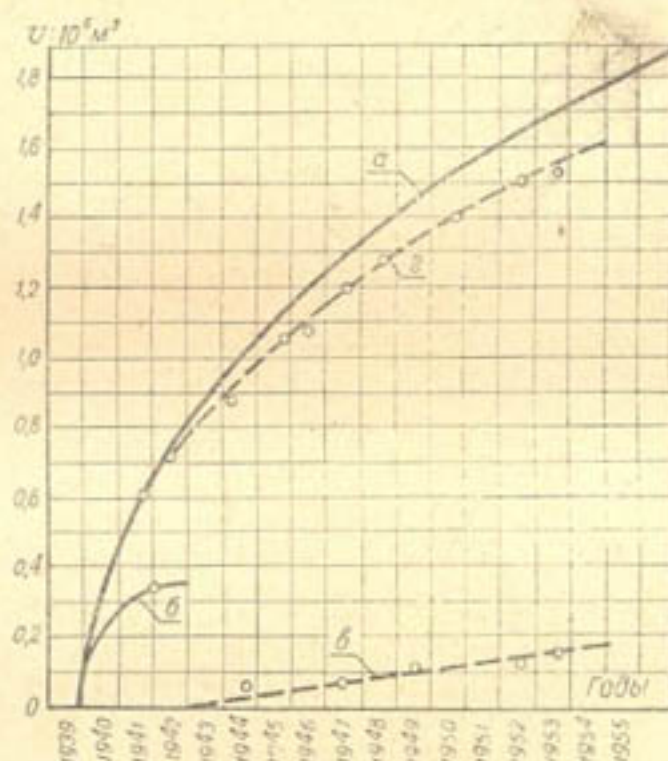


Рис. 3. Аккумуляция наносов в Газалкентском подпертом бьефе:

a — суммарный объем отложений по результатам расчетов; b — кривая объема заиления; z — объем занесения участка подпертого бьефа выше поперечника № 20; δ — объемы заиления и занесения подпертого бьефа ниже поперечника № 20.
° — данные полевых исследований.

зависимость удовлетворительно отражает процесс аккумуляции наносов в подпертых бьефах. Предлагаемая методика расчета была использована в Среднеазиатском отделении института Гидроэнергопроект при проектировании на реках Средней Азии некоторых гидроузлов (Уч-Курганского, Чарвакского, Головного, Средне-Чирчикских и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лапшенков В. С. Расчет заиления подпертых бьефов, „Гидротехническое строительство“, 1957, № 3.
 2. Алтуний С. Т. Регулирование русел рек при водозаборе, М., Сельхозгиз, 1950.
 3. Алтуний С. Т. Результаты полевых исследований русловых процессов у крупного гидроузла, Труды Института сооружений АН УзССР, Ташкент, АН УзССР, 1958, № 8.
 4. Алтуний С. Т. О заилении верхнего бьефа и размыв русла в нижнем бьефе плотины, „Гидротехническое строительство“, 1953, № 4.
 5. Вавилов А. С. Исследование заиления Бозсуйского водохранилища, Энергетический сборник, т. IV, Ташкент, 1935.
 6. Шолохов В. Н. К вопросу о формировании русел в бьефах низконапорных плотин на горно-предгорных участках рек, Труды САНИИРИ, вып. 84, Ташкент, 1957.
-

В. Б. ГУССАК

ОПЫТ МИКРОКИНОСЪЕМКИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПОТОКА С РАЗМЫВАЕМЫМ ДНОМ

Точное представление о явлениях на границе раздела двух фаз необходимо иметь при разработке теоретических основ некоторых дисциплин и решении таких важных практических задач, как самолето- и кораблестроение, борьба с заилением водохранилищ, управление притоком воды и солей к дренам — горизонтальным и вертикальным, вопросы промывок засоленных почв, речной гидротехники, ирригационного строительства и руслоформирования, борьба с эрозией и т. д. Пограничный слой в целях управления необходимо исследовать и при изучении проблемы усовершенствования смазок трущихся частей, разработке физико-химических основ понижения твердости при бурении и резании [14].

Несмотря на столь широкую и давнишнюю потребность в точных данных о природе явлений, происходящих в пограничном слое, до настоящего времени наши сведения в этой области еще недостаточны, особенно в отношении водного потока.

Метод микроскопического изучения придонного слоя потока с размываемым руслом, предложенный нами для изучения смыва почв, может, по-видимому, иметь некоторое значение и для изучения пограничных слоев вообще. Он существенно отличается от методов Пуазейля [18], Фейджа и Тауненда [17] и Секера [19].

МЕТОДИКА МИКРОКИНОСЪЕМКИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Намеченные объекты исследования — почвы и материнские породы — подвергались обычной при анализе подготовке и пропускались через миллиметровое сито. Полученный образец насыпался в камеру лотка типа 5^б [6] и укладывался со стандартным объемным весом. Перпендикулярно передней стенке лотка, выполненной из тонкого листового плексигласа, устанавливается бинокулярный микроскоп „МШ“ на универсальном штативе так, чтобы его оптические оси были расположены горизонтально. Лоток помещается на сконструированную автором массивную оптическую скамью со специальным суппортом, позволяющим при помощи кремальер с маховичками передвигать весь лоток параллельно и перпендикулярно его продольной оси на заданные расстояния. При значительных увеличениях это приспособление совершенно необходимо для выбора объекта исследования. С помощью такого суппорта может быть точно измерено расстояние от продольной стенки лотка (внутренней ее поверхности) до фокаль-

ной плоскости, в которой ведутся наблюдения. Это значит, что можно вести исследования структуры потока на таких расстояниях от стенки, как десятые, сотые и даже тысячные доли миллиметра. Суппорт, кроме того, опирается на шаровую головку, позволяющую менять наклон лотка.

Устройство оптической скамьи позволило вести киносъемку размываемого образца и сверху, т. е. в плане.

Бинокулярный микроскоп дает необычайно рельефную картину наблюдаемого объекта, а наличие двух окуляров позволяет использовать один для наблюдений, а другой — для киносъемки. Механизм оптической скамьи способствует передвижению лотка в трех направлениях и во время самой съемки, что дает возможность делать панорамные снимки.

Съемка производилась кинокамерой „Кодак“ с частотой от 16 до 50 кадров в секунду. Рапидная киносъемка была подготовлена, но не завершена. Тарировка киноаппарата делалась при помощи киносъемки секундной стрелки секундомера. Масштаб геометрических величин на кадрах определялся киносъемкой масштабной линейки. Увеличение применялось от $45\times$ до $120\times$, но чаще $60\times$ с тем, чтобы в поле зрения было около 1 мм^2 .

Лоток устанавливался таким образом, чтобы в нижней части кадра была видна поверхность почвы, а над ней — придонный слой, толщина которого составляла $0,6\text{ мм}$. Фокальная плоскость микроскопа в зависимости от задач исследования вводилась в лоток на заданное расстояние от стенки.

Для визуализации кинематической структуры придонного слоя использованы движущиеся частицы размываемого образца.

Таким образом, в поток не вводятся ни посторонних тел (эмульсии, блески и пр.), ни измерительных приборов.

Чтобы снять киноаппаратом в отраженном свете быстродвижущиеся частицы почвы, находящиеся за стеклянной стенкой под водой, требуется источник света большой мощности. Для этой цели была использована система „Юпитеров“ и киноламп общей яркостью 15 тыс. вт .

Свет их направлялся на объекты при помощи конденсоров и водяных фильтров, обеспечивающих защиту от теплового влияния. С целью наблюдений над скоростным полем в придонном слое применялось ультрамикроскопическое освещение (контражурная съемка).

Для изучения структуры придонного слоя с помощью киноаппарата через микроскоп на цветную пленку были засняты отдельные эксперименты с применением красителя. Выбранные кадры микрокинофильма подвергались статистической обработке по методике, успешно примененной М. А. Великановым и Б. А. Фидманом [2, 16]. Вся съемка велась при двух режимах течения воды в лотке:

1) $u = 13,8\text{ см/сек}$; $h = 0,5\text{ см}$; $Re = 690$ (движение, близкое к ламинарному);

2) $u = 18,7\text{ см/сек}$; $h = 0,73\text{ см}$; $Re = 1365$ (движение турбулентное).

Постоянство расхода обеспечивалось подачей воды (или другой размывающей жидкости) через сосуд Мариотта.

Полученный полнометражный кинофильм (в четырех частях) хранится в лаборатории физики и технологии почв Почвенного института Академии наук СССР, где и были начаты изложенные работы, ныне продолжающиеся в Институте почвоведения АН УзССР.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты ставились со следующими почвами и породами.

1. Разрез 2005 (П. М. Новиков, В. Б. Гуссак, 1945). Чернозем террасовый тяжелосуглинистый иловато-крупно-пылеватый на желто-буром суглинке (аллювиальном), пашня; горизонт A_p , 5—12 см. Бассейн р. Кутулук, Куйбышевское Заволжье.

2. Разрез 2008 (П. М. Новиков, 1945). Солонец корково-столбчатый суглинистый иловато-крупно-пылеватый на аллювиальной супеси, целина под типчаком и полынью; горизонт B_1 , 4—17 см. Солонцовая депрессия на первой надпойменной террасе р. Кутулук.

3. Разрез 2 (В. Б. Гуссак, 1935). Элювиальная красноземная почва тяжелосуглинистая на коре выветривания андезита, целина под папоротником, ежевикой и ольхой; горизонт B_1 , 30—40 см. Левый берег р. Чаква, Грузия.

4. Разрез без номера (А. А. Роде, 1948). Покровный легкий пылеватый суглинок, взятый в Подмоскowie на глубине 2—3 м.

5. Разрез 2 (Г. И. Вайлерт, 1951). Орошаемая луговая слабозасоленная суглинистая на агроирригационных наносах, подстилаемых слоистыми аллювиальными, преимущественно тяжелосуглинистыми отложениями; хлопковое поле; горизонт 100—110 см. Кунградский район Кара-Калпакии.

6. Разрез 2 (В. Б. Гуссак, Я. М. Насыров, 1955). Серозем типичный суглинистый на лессе ташкентского эрозионно-аккумулятивного цикла (по Ю. А. Скворцову); горизонт 540—560 см. Целина. Астрономическая обсерватория в Ташкенте.

Два последних образца, хотя и подвергались микроскопическим исследованиям в лотке, на кинолентку не были засняты; это предполагается сделать в ближайшее время.

7. Помимо указанных почв и пород, опыты ставились также с чистым кварцевым песком Люберецкого месторождения, прокаленным, обработанным соляной кислотой и промытым.

Для исследования пограничных слоев такие операции являются обязательными, так как без них остается неизвестным, что повлияло на структуру слоя: характер минерала зерна или всегда присутствующие на нем коллоидные пленки. Несоблюдением этого требования можно объяснить слабую воспроизводимость многих опытов по размыву так называемых „модельных смесей песков“, проведенных в гидротехнических лабораториях.

Не менее важным требованием является также подробная характеристика минералогического состава песков и в дополнение к данным о механическом составе — микроскопическое описание преобладающей формы зерна. Последнее особенно ценно для исследования явлений, происходящих в тонком придонном слое.

Морфологической, химической, физико-химической и физической характеристик перечисленных образцов здесь не приводится, так как они даются в работах авторов, описавших указанные разрезы.

При подборе образцов мы стремились получить картины межфазовой границы для самых различных физико-химических условий — от соленых и засоленных почв до красноземов и от тяжелых суглинков до песков и лесса.

Некоторые результаты микроскопических наблюдений над пограничным слоем эродирующего потока в лотке

Для представления о качественной стороне явлений, происходящих на межфазовой границе в потоке, изложим кратко содержание полученного нами фильма.

Три кадра шкалы с делениями определяют геометрический масштаб съемки. Первый заснят при увеличении $16\times$ с полем зрения $8\times 4,6\text{ мм} = 36,8\text{ мм}^2$; второй — при увеличении $60\times$ (рис. 1) с полем зрения $1,8\times 0,7\text{ мм} = 1,26\text{ мм}^2$ и третий — при увеличении $150\times$ с полем зрения $0,7\times 0,45\text{ мм} = 0,32\text{ мм}^2$.

С помощью панорамной съемки показаны особенности поверхности различных образцов почвы.

Фокальная плоскость микроскопа обладает незначительной глубиной резкости (при увеличении $45-60\times$ эта глубина равна $0,1-0,2$ мм), поэтому в поле зрения резко видна лишь незначительная часть поверхности образца. То, что находится ближе или дальше фокальной плоскости, становится неясным. Поэтому на снимках передний и задний планы представлены „облаками“ (расплывчатые изображения частиц, не находящихся в фокусе микроскопа).

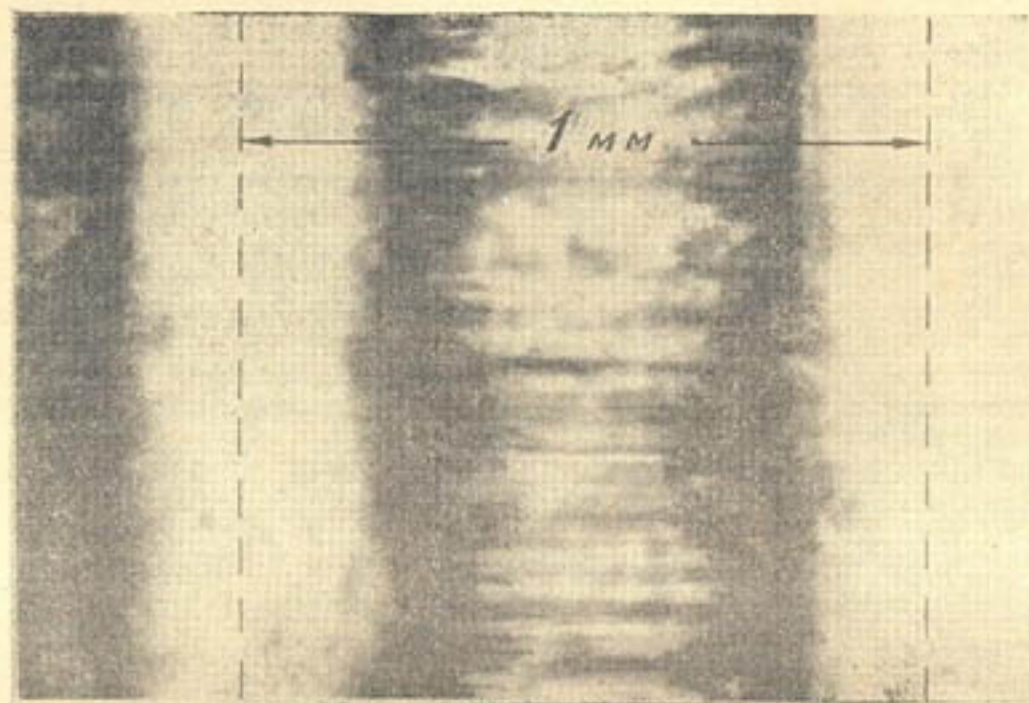


Рис. 1. Масштабная линейка при увеличении 60.

Для поверхности образца покровного суглинка характерны сравнительно крупные агрегаты размером $0,2-0,3$ мм, погруженные в массу мелких песчинок диаметром несколько сотых миллиметра. Важно, что форма таких агрегатов плавная, округлая без резких граней. Как дальше увидим, формой частиц определяются некоторые важные особенности структуры придонного слоя.

При большом увеличении отчетливо видно и строение агрегатов покровного суглинка. Они состоят из кварцевых зерен разной величины, слегка просвечивающих по краям, скрепленных желтовато-ржавыми пленками и мелкими частицами в рыхлые комочки.

Совершенно иная картина представляется при рассмотрении поверхности образца чернозема. Тут перед нами почти черные комки неправильной формы, нередко с отвесными стенками, лежащие в хаотическом беспорядке. Песчано-пылеватых частиц не видно.

Каждый из таких комков имеет сложную структуру: видно, что он состоит из более мелких комочков, между которыми отчетливо заметны поры. Поэтому при известном освещении поверхность такого комка (его диаметр $0,5$ мм) кажется ячеистой. Даже при увеличении $120\times$ не удастся открыть неоднородности в гумусовой прокраске, так как микроагрегаты, видимо, полностью пропитаны органическим веществом. Мелких корешков внутри микроагрегатов почти нет. По всей вероятности, основная их масса распределяется не внутри агрегатов менее 1 мм, а вне их. Общие размеры агрегатов колеблются незначительно, в пределах около $0,5$ мм.

Поверхность солонца отличается общим более серым тоном, большей остроугольностью агрегатов и более компактным их сложением.

Возможно, что именно благодаря этой гладкой поверхности агрегата, которую предполагала и И. М. Горькова, солонец обладает той своеобразной стойкостью в потоке, которая наблюдалась нами в опыте с размывом образца в лотке 8° [7].

Очень своеобразна картина поверхности образца краснозема.

Здесь нередки обломки „громадных размеров“ (до 1 мм) самой неправильной формы, подчас даже причудливой. Грани отдельностей довольно резкие, но встречаются и округлые частицы. Характерным отличием этих агрегатов являются черные точки (видимо, включения марганца). Наряду с крупными обломками много и очень мелких, но также имеющих характер не комков, а обломочков неправильной формы.

В микроскоп видно, что агрегаты краснозема состоят из частиц разного состава, хотя они кажутся достаточно массивными. Общий тон поверхности имеет чуть заметный красноватый оттенок, сильно сглаженный ярким освещением. Цвет частичек, входящих в агрегат, разный: от черного, темно-коричневого до светло-желтого. Эта пестрота окраски и формы агрегата краснозема очень характерны.



Рис. 2. Микроагрегат диаметром 0,25–0,1 мм типичного серозема. Гориз. 0–5 см. Увеличение 550, препарат № 50 (микрорисовка автора).

Агрегаты лесса и аллювиальных отложений Аму-Дарьи, а также сформированных на них почв имеют свои особенности: первые отличаются высокой компактностью укладки механических элементов, довольно разнородных по цвету и форме; особенно это заметно на микроагрегатах (рис. 2). Вторые содержат громадное количество обломков слюды, окрашенной в различные тона — от совершенно прозрачных до ржаво-бурых, рыхло скрепленных глинистым веществом.

Далее в фильме демонстрируется без увеличения работа лотка 5° в момент подачи в него воды. Когда волна попуска начинает подходить к образцу, снова даются кадры микрокиносъемки.

Через кадр прокатывается фронт волн, отчетливо показывающий их разрушительную работу — волна как бы гонит вперед себя наиболее неустойчивые частицы, которые начинают шевелиться еще до подхода самой волны.

Когда горизонт воды поднимается и постепенно уходит за верхнюю рамку кинокадра, остается картина работы потока в придонной области. На поверхности образца покровного суглинка при пропуске волны некоторые крупные комки мгновенно расплываются как сахар, волна как бы растирает их. Часть из них все же сохраняется, создавая микрорельеф дна.

С увеличением расхода между отдельными возвышениями возникают потоки мелких пылеватых частиц, которые движутся самыми причудливыми путями: некоторые агрегаты огибаются ими с боков, некоторые сверху и т. д. Создается полное впечатление вида речно-

го потока. Под микроскопом заметно, что в образце покровного суглинки отсортировались какие-то плитки и листочки (слюда), которые становятся на ребро и катятся с заметной быстротой.

Кроме них, в поле зрения (т. е. на расстоянии 0,5 мм от дна) проносятся более крупные агрегаты. Чем больше диаметр частиц, тем выше его скорость. Это удалось проверить и с помощью секундомера, так как длина поля зрения известна.

Скорость движения частиц в придонном слое характеризуется следующими цифрами:

Диаметр, мм	Скорость, мм/сек
0,05—0,10	2—4
~0,50	12—15

Данные получены те же, что у Фейджа [17].

Нужно иметь в виду, что крупные частицы представлены в нашем опыте агрегатами, а мелкие — элементарными частицами.

Крупные агрегаты при определенной средней по сечению скорости потока развивают более высокие скорости, чем мелкие, катящиеся по дну элементарные гранулометрические частицы. А это значит, что в данном случае первые смываются легче, чем вторые.

Интересен процесс отрыва „крупных“ агрегатов от дна; здесь тоже полностью повторяется картина, наблюдающаяся в реках. Агрегаты, подобно скалам в реке, подвергаются размывающему действию данных „потоков“. Не следует забывать, что в поле зрения виден всего 1 мм² и ширина таких „потоков“ составляет десятые и даже сотые доли миллиметра. Но эти потоки, нагруженные „обломками“, т. е. пылеватыми частицами размером несколько сотых миллиметра, коррадируют агрегат, вынося мелкие частицы со дна, что вызывает постепенное его обнажение.

Прежде чем тронуться с места, агрегат испытывает характерные толчки; он слегка приподымается концом, обращенным вниз по течению, и ложится на место; иногда даже поворачивается вокруг вертикальной оси и вдруг мгновенно уносится. Интересно при этом, что ни разу мы не наблюдали, чтобы он катился по дну; всегда его путь представлял собой пологую параболу.

Что касается неподвижных участков дна, к тому же сколько-нибудь выступающих, то над ними донные потоки приобретают повышенную скорость; так как в данном случае агрегат имеет плавную округлую форму, то в области гидравлической тени скорости снижаются, но завихренности не образуется. Наиболее длинные штрихи — следы движения мелких частиц — наблюдаются над агрегатом; позади него — более короткие штрихи, здесь скорости резко снижены.

Течение скорее похоже на движение идеальной жидкости; на микрофотографии даже видна задняя критическая точка — область со скоростями, приближающимися к нулю.

Скорости можно примерно рассчитать. Частица над агрегатом за время выдержки кадра (1/25 сек.) успевает пролететь почти все поле зрения, т. е. около 1 мм; тогда ее скорость составляет 25 мм/сек. Короткие штрихи в области затишья имеют длину порядка 0,1—0,05 мм, что дает 1—2 мм/сек, т. е. тот же порядок цифр, который мы получили при непосредственных наблюдениях с помощью секундомера.

Таким образом, полученный спектр обтекания выступа поверхности величиной 0,2—0,3 мм не оставляет сомнения в том, что над этим выступом имеется область пониженного давления (там,

где повышенные скорости), а позади него — давление более высокое, т. е. должна возникнуть динамическая подъемная сила, если вода проникнет под агрегат.

В разрушении поверхности образца почвы или породы громадную роль играет воздух. В виде серебряных баллонов диаметром 0,2—0,3 мм он появляется на поверхности всего образца.

К сказанному нужно добавить, что пока пузырек воздуха сидит между почвенными частицами на дне, он испытывает вращение вокруг горизонтальной оси в сторону движения потока, т. е. в сторону вращения катящихся по дну мелких частиц.

Наблюдать вращение пузырька воздуха можно лишь при наличии мельчайших песчинок, сидящих на стенке пузырька. Тогда в микроскоп видно, как эти песчинки крутятся вокруг горизонтальной оси с громадной быстротой.

Если замедлять течение в лотке, вращение пузырька также замедляется, а с прекращением движения воды в лотке останавливается и пузырек; при возобновлении течения воды немедленно восстанавливается и вращение пузырька.

Мы полагаем, что вращение катящихся по дну мелких частиц, особенно вращение пузырька воздуха, свидетельствует о наличии циркуляции вокруг этих частиц.

Об этом же свидетельствует направление вращения по течению.

Пока мы не знаем, вызвана ли эта циркуляция наличием „концевого вихря“ или высоким градиентом скоростей в придонной области.

Несколько по-иному ведет себя образец чернозема.

После прохождения волны попуска „пейзаж“ становится мрачнее, а черные комки покрываются как бы блеском. В углублениях не видно никакого движения, так как здесь нет элементарных частиц вне агрегатов. От последних иногда откалываются обломки и мгновенно уносятся.

Спорадически отрываются и уносятся также отдельные агрегаты. Вначале их как бы что-то постепенно выталкивает снизу вверх, затем они, качнувшись несколько раз, вдруг сразу отрываются от поверхности и стремительно уносятся.

Спектры обтекания здесь установить трудно, так как нет несущихся мелких частиц.

Мы ввели в поток поверх образца чернозема около 0,2 г покровного суглинка. Немедленно началось оживленное перекачивание по углублениям мелких частиц, с неопровержимостью свидетельствующее о наличии самых причудливых донных течений и здесь.

Однако в отдельные особенно глубокие и изолированные „пещеры“ (размеры их около $0,1 \times 0,1$ мм) течения эти, по-видимому, не проникают и здесь находится область почти полного затишья. Завалившиеся сюда песчинки остаются на месте или переходят как бы во взвешенное состояние.

Интересен обратный опыт. На поверхность образца покровного суглинка подавались агрегаты чернозема; они мгновенно уносились целиком или разрывались защемленным воздухом. Этот опыт еще раз подтвердил, насколько „легче“ поток уносит агрегат сравнительно с монолитной частицей, хотя бы и значительно меньшего диаметра.

Из фильма также видно, что большей частью штрихи частиц большого диаметра одновременно и самые длинные; следовательно, они имеют и наивысшую скорость.

Картина выделения воздуха для чернозема та же, что для суглинка.

На некоторых образцах чернозема, спустя определенное время после начала попуска воды в лотке, в поле зрения также появляются потоки элементарных частиц. Однако они всегда очень скудные и непостоянные. Это является микроскопическим подтверждением того всеобщего закона действия эрозионных потоков, который всегда обуславливает облегчение механического состава эродируемой поверхности.

После подачи в лоток определенного расхода смыв происходит с достаточной для наблюдения интенсивностью в продолжении какого-то времени, затем интенсивность его ослабевает и, наконец, смыв прекращается.

Такое постепенное падение интенсивности смыва во времени было констатировано нами в опыте на монолитах в большом лотке, а также полевыми наблюдениями.

Это заставляет удивляться далеко идущей аналогии между макро- и микроформами эрозии.

Указанная аналогия между макро- и микроявлениями свидетельствует также об известной правомочности мелкомасштабного моделирования, когда речь идет о движении наносов или вообще о размыве; американские специалисты по моделированию уже давно пользуются этим обстоятельством.

Поведение образца краснозема не похоже ни на первый, ни на второй случай.

Наступление водяной волны попуска мало отражается на образце, и если бы не движение частиц, агрегаты краснозема казались бы стоящими на воздухе, а не под водой.

Своеобразие этой почвы заключается в том, что в ней причудливым образом сочетаются качества обоих рассмотренных выше образцов: чернозема и покровного суглинка. Здесь имеются как крупные почти неразмываемые „глыбы“ самых разнообразных форм, так и огромное количество мелких и мельчайших легких и тяжелых частичек, которые находятся в непрестанном оживленном движении.

Для исследования структуры придонного слоя над размываемой поверхностью этот материал наиболее удобен. Именно для такого образца микрокинофильм зафиксировал, наконец, явно выраженные вихри.

Один из таких типичных вихрей показан на помещаемых ниже кадрах (рис. 3).

Здесь в кормовой части агрегата размером примерно 0,25 мм виден ток частиц, поднимающихся по отвесной стенке вверх и попадающих выше в слой с более высокими скоростями, в котором они мгновенно уносятся.

Следовательно, когда мелкие частицы уже пришли в движение, они могут выбрасываться вверх индивидуальными вихрями, возникающими позади отдельных выступов шероховатости даже микроскопической величины.

На рис. 4 общее направление течения, как и прежде, справа налево. Здесь сформировалось два вихря: один позади стенки агрегата с обратным уклоном, а другой — в „воронке“, сложенной частицами почвы.

В левом вихре интересны скорости (рис. 4): ползущая *a*, ускоренная *б* и мгновенная *в*. В эту кормовую область агрегата частицы затаскиваются с боков, попадают в вихрь (валец) и начинают мед-

ленно двигаться в обратном направлении, затем поднимаются по стенке и попадают в слой с более высокими скоростями, мгновенно уносящий их. Этот вихрь имеет горизонтальную ось. У правого же вихря — вертикальная ось. Вихрь с вертикальной осью также может поднимать частицы вверх, засасывая их внутрь вихря.

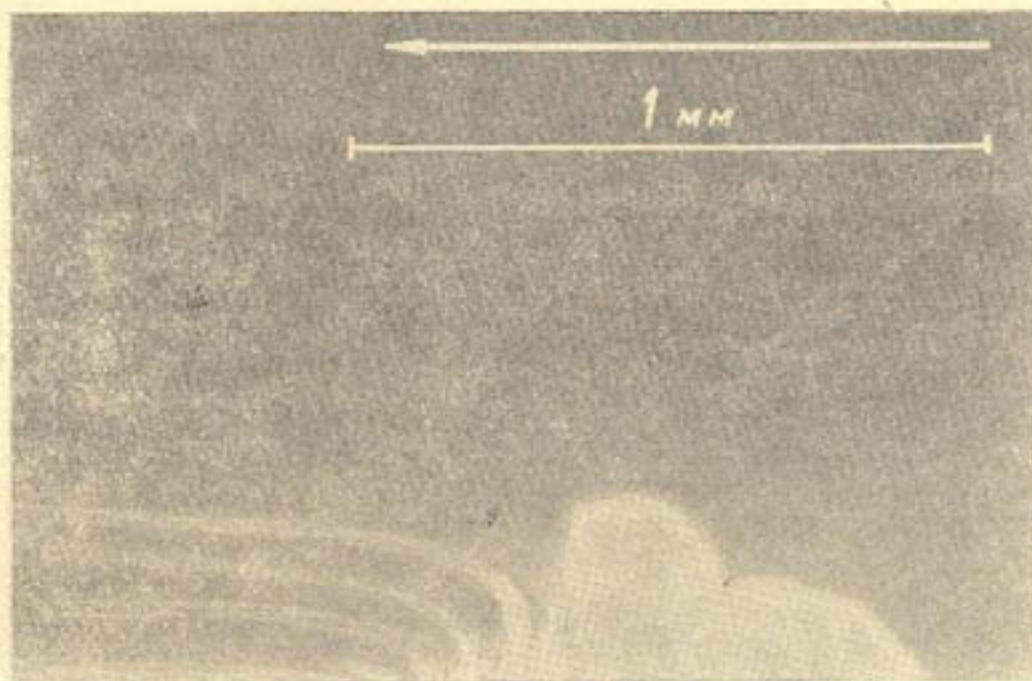


Рис. 3. Обтекание агрегата с отвесной кормой; образуются вихри.

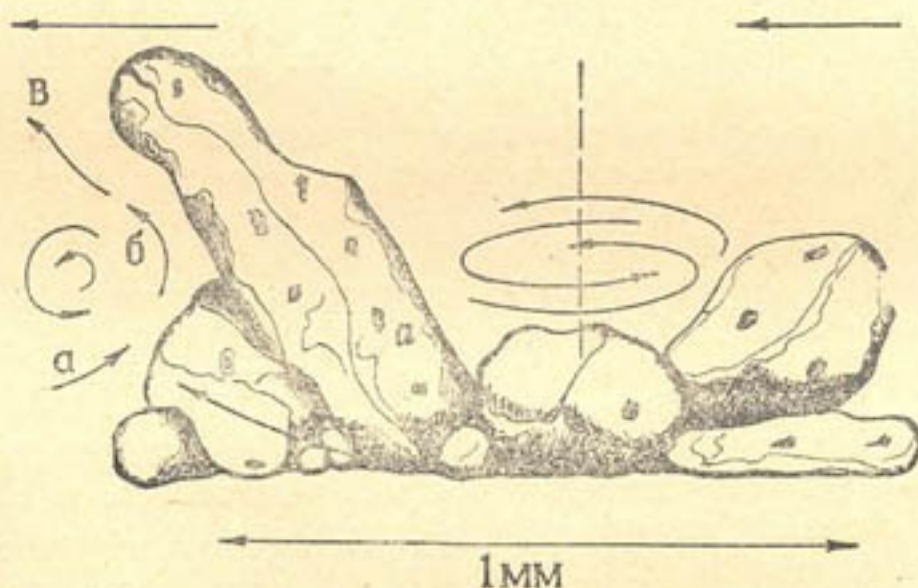


Рис. 4. Возникновение микроскопических вихрей между агрегатами красной земли. Зарисовка с кадра микрокинофильма. Увеличение 60.

Оба примера (рис. 3 и 4) в известной мере аналогичны случаю обтекания крупных препятствий шара или цилиндра бесконечной длины. Здесь, видимо, также имеет место отрыв потока от поверхности тела, наличие медленного обратного движения в результате возникновения вихря. Снова — далеко идущая аналогия между макро- и микроформами.

Необходимо, по-видимому, признать, что для частиц разной формы и разным образом расположенных относительно друг друга вихрь, циркуляция и подъемная сила, конечно, будут формироваться неизмеримо сложнее, чем для крыла самолета.

Марганцевые зерна во время смыва краснозема, подобно песку в суглинке, сразу отсортировываются и их все больше скопляется на поверхности образца. Они служат оригинальным индикатором „степени смывости“ образца. Здесь опять наблюдается аналогия с явлением увеличения скелета на поверхности почвы в результате смыва („эрозионная отмостка“).

Извилистость пути движения частиц в плоскости XOZ хорошо видна в фильме. Так, на одном кадре штрих от движения частицы диаметром 0,02 мм находится в основании большой „горы“ — агрегата величиной около 1 мм. На втором — частица начинает подниматься вверх по выступу на агрегате. На третьем — она ползет в узкую горизонтальную щель, из которой выносятся влево.

Таким образом, параллелеструйности течения в придонной области во всех рассмотренных случаях совершенно не наблюдается. Нет ее и в горизонтальной плоскости, если смотреть сквозь поток сверху (в плоскости XOY).

В микроскоп отчетливо видны две важные детали, хорошо заметные на экране при демонстрации фильма, но мало понятные на фотографии.

У самой боковой стеклянной стенки лотка выделяется малоподвижный слой агрегатов толщиной примерно 0,2 мм. Залетающие сюда обломки как бы притягиваются магнитом к стенке и остаются здесь надолго. Поэтому этот пристенный слой образца приподнят над его поверхностью на несколько десятых миллиметра, а на поверхности потока над этим валом наблюдается мениск воды, также малоподвижный.

На кадрах фильма сторона поверхности образца, обращенная к верхней рамке, находится не в фокусе. Это и есть пристенная область.

Сказанное не оставляет никаких сомнений в том, что картина течения в придонной области, при размываемом дне из почвы, ничего общего не имеет с течением в пристенной области, когда эта стенка из стекла.

В последнем случае, помимо разницы в шероховатости, наблюдается наличие каких-то сил, вызывающих притяжение к стеклу отрицательно заряженных (в результате возникновения на них потенциала протекания) почвенных частиц.

Отсюда понятно, почему Фейдж при микроскопировании (увеличение в 2—3 раза больше нашего) пристенного слоя, т. е. слоя, прилегающего к стеклу, наблюдал, что отдельные группы пылинок сменяются как одно целое. Эти пылинки находились под влиянием сил притяжения стекла, и все же „отзвуки“ турбулентности достигали и их.

Можно установить также, почему в опытах А. И. Лосиевского [11, 12] для поднятия эбонитовой модели гальки над стеклянным дном требовалось приложить значительную силу. Здесь приходилось отделять гальку от придонного слоя на стекле.

Вторая характерная черта, если смотреть сквозь поток сверху, заключается в том, что и в плане на образце имеются свои разнообразные пути движения частиц, а следовательно и воды, хотя общий стрежень донного течения проходит в осевой части лотка. Эта картина убедительно показывает, насколько прав Е. А. Замарин [8], утверждающий, что от ламинарной пленки, если бы она на дне и была, при турбулентном движении должны остаться одни „обрывки“. Фактически ее здесь и не было.

При демонстрации кадров обтекания образца солонца видно, что влияние волны попуска очень своеобразно: идет заметное „вспухание“ агрегатов и всего образца так, что обычно поверхность образца даже выходит из поля зрения.

В этом образце содержалось много защемленного воздуха. В кадре, заснятом без увеличения, прямо с камеры лотка и проектированном на экран, хорошо видно, что после волны попуска с поверхности образца поднимаются „тучи“ пузырьков воздуха.

В одном из ленинградских научных учреждений после демонстрации фильма нас спросили, не было ли в воде, подающейся на лоток, повышенного содержания газов.

Пришлось вмонтировать дополнительные кадры, показывающие проход воды по дну лотка (без почвы), причем в этом случае никаких пузырьков воздуха не выделялось.

В глубине образца солонца, видимо в связи с набуханием в первую очередь верхнего слоя агрегатов, задерживается большое количество воздуха; он и выходит в виде столь заметного количества пузырьков.

После прохода волны попуска на экране хорошо видно появление признаков высокой гидратированности частиц (еще одна отличительная черта поведения образца солонца в потоке).

Благодаря специальному (ультрамикроскопическому) освещению водные оболочки вокруг агрегатов становятся отчетливо заметными. Другие образцы не дают такой картины. Но надо отметить, что непосредственно в микроскоп сольватные оболочки плохо заметны; а когда кадры спроектированы на экран, они выявляются очень эффектно благодаря изменению в лучепреломлении связанной воды. Крайне важно и интересно было бы рассмотреть такой объект в поляризованном свете (нами эти работы еще не завершены).

Немедленно после того как поток потащил по дну перекатом первые частицы образца солонца, обращает на себя внимание крайняя медлительность их движения. На экране хорошо видно, что перекаату частиц препятствуют толстые водные пленки. С этим явлением связана низкая эродируемость солонца при почти полном отсутствии фильтрации. Спустя некоторое время после начала опыта на солонце движение крупных и мелких частиц почти полностью прекращается, а на ранее рассмотренных образцах движение в это время еще продолжается. Все частицы поверхности солонца кажутся как бы вмазанными в какую-то киселеобразную массу. Похоже, что весь придонный слой водного потока превратился в связанную воду.

При увеличении скорости течения воды в лотке на поверхности образца солонца возникают оригинальные явления, не имеющие никаких аналогий в макром мире.

Если направить фокальную плоскость микроскопа на агрегат такой же величины и формы, как и у краснозема, то и здесь мы увидим ток частиц, идущий вверх по кормовой стенке агрегата. Однако движение их замедленное. Налетая на выступ шероховатости спереди или с боков, они не уносятся дальше, как было у красноземов и других образцов, а, перекатываясь через агрегат, накапливаются на его задней стороне в виде вытянутого по течению хвоста или „флага“, идущего от вершины выступа.

Связь между частицами „флага“ чувствуется прочная. Когда новая частица залетает в кормовую область агрегата, ее притягивает, как магнитом, и она нанизывается на „флаг“. Этот „флаг“ не полощется, как струя красителя, но поворачивается целиком по течению.

Длина его достигает 0,1—0,2 мм при высоте агрегата 0,3—0,4 мм. Иногда агрегат уносится вместе с „флагом“, нередко от „флага“ отрываются куски, когда он достигает определенной величины; затем он снова начинает нарастать.

Если прекратить течение воды в лотке, „флаг“ ложится на дно, а при последующей подаче снова вытягивается по течению.

При микроскопировании эрозии образца солонца сделано еще одно наблюдение. Оказалось, что около некоторых выступов шероховатости при более значительном увеличении обнаруживаются мелкие песчинки — „спутники“. Такой спутник во все время течения воды в лотке парит на определенном расстоянии от дна и поверхности агрегата, как бы привязанный к последнему невидимыми нитями.

С прекращением расхода в лотке „спутник“ падает на свой агрегат; после возобновления подачи воды он снова отходит на то же расстояние и не уносится течением. Видимо, силы притяжения частицы и силы отталкивания, вызываемые потоком, уравновешены. Возможно, что все эти явления происходят внутри связанной воды. На других образцах пород или почв их не наблюдалось.

Агрегаты лесса и аллювия низовий Аму-Дарьи под воздействием волны попуска мгновенно разваливаются на пылеватые частицы, но не так, как это происходит у покровного суглинка. Распад их заканчивается на стадии микроагрегатов, „плавучесть“ которых благодаря плотной упаковке невысокая. Поэтому они долго сохраняются на дне потока. Из аллювия при этом отделяются пластинки слюды, которые под воздействием потока „выкатываются“ в первую очередь.

Для более подробного выяснения структуры придонного слоя потока, идущего по почве, были сделаны микрокиносъёмки и на цветную пленку.

Кристаллы некоторых специально подобранных красителей размером 2—3 мм погружались в поверхность образца в разных местах потока — по его осевой линии, ближе к боковой стенке и у самой стенки; затем они выдвигались на разную высоту над поверхностью, включая заделку их заподлицо; расставлялись в разных комбинациях — по одному, два, три и т. д. В некоторых опытах кристаллы были разного цвета. Наконец, в варианты опыта была введена обработка поверхности образца гидрофобизирующими составами, а также поставлены и другие опыты, которые завершить не удалось.

Цветными фильтрами в отдельных экспериментах создавался наиболее благоприятный фон для наблюдений. Если кристалл давал струи глубокого фиолетового тона, то фон брался ярко-желтый, если струи окрашивались в вишневый тон, то фоном служил бледно-зеленый цвет и т. д. Эти кадры выглядят на экране необычно эффектно.

Статичный рис. 5 дает слабое представление о натуре. На нем показан кристалл красителя, выставленный на 1—1,5 мм над поверхностью образца покровного суглинка в осевой части потока.

За его вершиной отчетливо видна турбулентная спутная струя, в которой окрашенные струйки хотя еще и не слились, но переплетены в хаотическом беспорядке (чем дальше от кристалла, тем более увеличивающемся). У основания кристалла, также позади него, возникла воронка вращения — вихрь, форма которой прекрасно очерчена окрашенными струями; в ней крутятся мельчайшие частички грунта, принесенные потоком. Спустя некоторое время, кристалл мгновенно уносится, и все описанные выше явления исчезают.

Был поставлен следующий опыт: кристалл заделали в поверхность образца заподлицо, также в осевой части потока (рис. 6). На рис. 6

любопытно то, что отдельные струи придонного слоя попадают на кристалл красителя под таким углом, что, будучи окрашенными и потому видимыми, отражаются почти вертикально вверх.

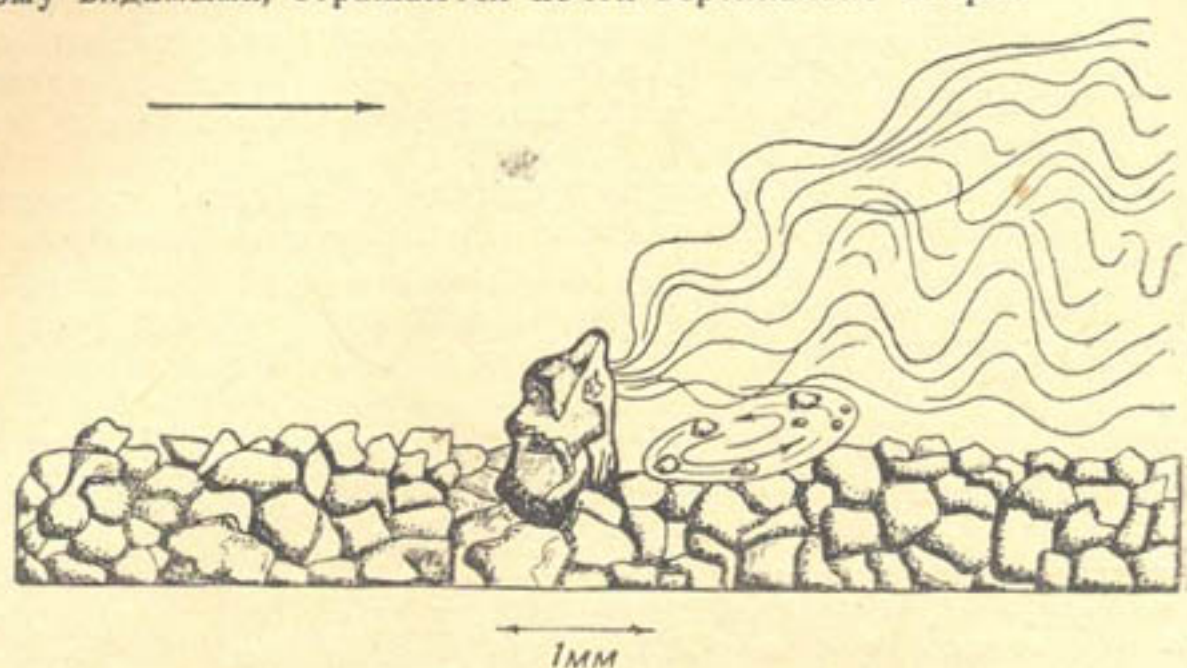


Рис. 5. Турбулентность спутной струи позади кристалла красителя и образование вихря (зарисовка с кадра цветного микрокинофильма).

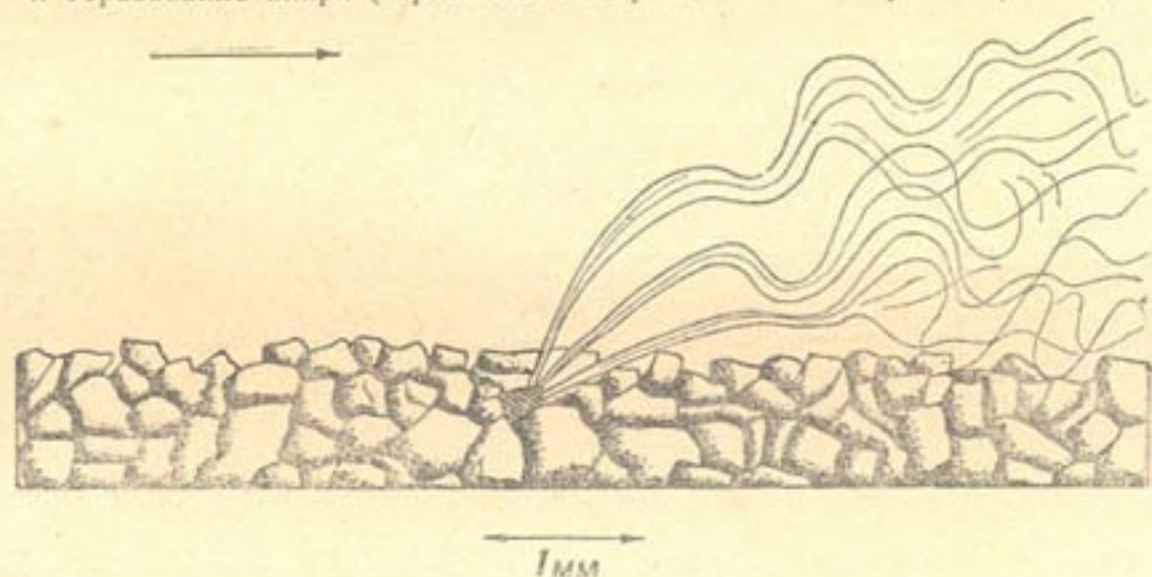


Рис. 6. Кристалл красителя заделан подлицо с дном в осевой части потока (зарисовка с кадра цветного микрокинофильма).

В другом опыте кристалл погрузили в образец вплотную к боковой стенке лотка. След окраски слабо полощется по течению; парализующая роль стеклянной стенки и вся особенность возникающего здесь пристенного слоя до очевидности ясны.

Цветная киносъемка еще раз показала, что если режим течения в придонном слое (когда дно сложено почвой или грунтом) турбулентный, то в том же потоке при тех же условиях режим течения у стеклянной стенки близок к ламинарному.

Помимо чисто качественных наблюдений над особенностями придонного слоя, при помощи микрокиносъемки была сделана также попытка охарактеризовать его кинематическую структуру и дать некоторые количественные показатели.

В качестве образца был использован краснозем; увеличение взято $60\times$; освещение — ультрамикроскопическое; участок поверхности образца имеет сравнительно плавный рельеф.

Для характеристики скоростного поля в пограничном слое в поток не вводилось никаких посторонних тел и приборов. Поток визуализировали частицы почвы, подвергающиеся смыву. Выдержка при киносъемке была подобрана так, чтобы пролетающие частицы оставляли на темном фоне белые штрихи, по длине которых судили об их скорости. Одновременно измерялся и угол наклона пути частицы к горизонту.

Предельные скорости движения частиц определяли и другим способом. На данном кадре была выбрана одна частица; наблюдение за ее движением от кадра к кадру позволяет определить скорость движения частицы, если известно время, проходящее между сменой двух смежных кадров.

Таблица 1

Статистические характеристики изменчивости осредненных по кадру суммарных скоростей, мм

Z , мм	$\bar{u}$, мм	σ	m	V , %	P , %	$\frac{(\bar{u}_2 - \bar{u}_1)^2}{m_2^2 + m_1^2}$	m_2	$\frac{(\sigma_2 - \sigma_1)^2}{m_{\sigma_2}^2 + m_{\sigma_1}^2}$
0—0,10	3,375	0,765	0,071	22,7	8,1		0,121	
0,11—0,20	4,615	0,688	0,153	14,9	3,3	29,5	0,109	0,2
0,21—0,30	6,075	1,590	3,356	25,1	5,9	14,2	0,252	10,8
0,31—0,40	8,015	2,160	0,483	25,9	6,0	10,0	0,343	1,8
0,41—0,50	9,330	2,660	0,595	29,5	6,6	1,9	0,421	0,8
0,51—0,60	11,143	3,770	0,942	33,8	8,5	3,6	0,668	2,0

Примечание. Z — ордината высоты; σ — среднее квадратичное отклонение; m — ошибка среднего; V — коэффициент вариации; P — точность ответа; $\bar{u}$ — скорость.

Сопоставление длины пути частицы на одном кадре с длиной пути перемещения той же частицы на трех смежных кадрах показало, что время смены кадров относится ко времени экспозиции примерно как 3:2. Отсюда экспозиция при 40 кадрах в 1 сек. должна быть примерно равна 1/100 сек.

На кинокадрах хорошо видна граница между поверхностью образца и черным фоном, поэтому легко измерить ординаты несомых частиц по масштабу увеличения.

Координата взвешенной частицы по оси X измерялась как расстояние до правой стороны рамки кадра. Диаметр частицы также определялся.

Все эти измерения осуществлялись на отпечатанных микрофотограммах.

Было обработано семь лент по три кадра каждая, причем одна лента от другой отделялась сроком в 0,12 сек. Это своего рода выборка во времени, пока еще недостаточная.

С целью показать возможности метода, а также в связи с совершенным отсутствием аналогичных данных в известной нам литературе полученные цифры были все же обработаны (табл. 1).

При вычислении пути частицы (табл. 1) по длине штриха на микрофотографии диаметр частиц не исключался, так как они, как видно из фильма, медленно движутся.

По высказываниям М. С. Вызго и И. К. Никитина, астигматические искажения на фотограммах, несомненно, имеются, но при более точных экспериментах их можно избежать.

Для построения эпюры осредненных, суммарных скоростей в продольной вертикальной плоскости придонного слоя осреднение велось по времени и объему следующим образом.

Мгновенные скорости частиц в данной точке в каждом кадре группировались по высоте над дном в шесть групп через интервал 0,1 мм. Скорости, осредненные по каждому интервалу (по объему), для каждого кадра составляли варьирующие ряды, а по всем кадрам (с периодом осреднения, достигающим около 1 сек.)¹ послужили основанием для построения профиля суммарных скоростей.

Выводы из приведенных в табл. 1 данных можно свести к следующему.

1. Изменение осредненных скоростей по вертикали в придонном слое в описываемом опыте осуществляется по линейному закону.

2. Эмпирическое уравнение (см/сек) такой прямой имеет вид

$$u = 17Z + 0,25.$$

3. Как видно из уравнения, есть основание полагать, что в нашем опыте донная скорость имеет конечное значение при $Z=0$ и $u=0,25$ см/сек.

Это же, как указывалось, следует и непосредственно из микроскопических наблюдений.

4. Из табл. 1 вытекает также, что достоверность (в статистическом смысле) изменений осредненных суммарных скоростей по профилю в четырех из пяти хорошая. Наивысшей достоверностью отличается разность скоростей в двух первых, считая от дна, интервалах высоты.

Приемлема также величина R , она колеблется в пределах 5—8%.

5. Среднее квадратическое отклонение σ для суммарных скоростей растет по мере удаления от дна, что является показателем увеличения в этом же направлении пульсации скоростей по величине.

Табл. 2, 3 дают представление об изменении по вертикали в нашем лотке, в придонном слое, продольной и вертикальной составляющих, найденных путем проектирования суммарных скоростей на оси.

Наиболее интересен факт, хотя и слабого, но определенного возрастания по мере удаления от дна вертикального компонента скорости в пределах значения ординаты 0—0,6 мм (поле зрения микроскопа).

В опытах А. И. Лосиевского [12] в этой области потока подъемная сила тоже сначала растет, а уменьшаться начинает лишь после удаления от дна более чем на 1 см.

Возможно, что наши данные отвечают нижней ветви кривой А. И. Лосиевского, так как подъемная сила потока связана со средней суммарной его скоростью (квадратичным законом).

Наличие конечного значения вертикальной составляющей на дне свидетельствует, как нам кажется, о роли потенциала протекания.

¹ Период между кадрами—0,02 сек.

Значения вертикальной составляющей в нашем опыте (во всей толще придонного слоя) оставались все время ниже значений продольного компонента. В этом сказалась укладка образца: при рыхлом расположении частиц они более подвержены действию лобового сопротивления, чем подъемной силы. Возможно, что это также результат ничтожных глубин потока, принятых в нашем лотке.

Т а б л и ц а 2

Продольная составляющая, осредненная по кадру, мм/сек

Номер		Высота над дном, мм					
ленты	кадра	0—0,10	0,11—0,20	0,21—0,30	0,31—0,40	0,41—0,50	0,51—0,60
0	1	3,7	5,8	8,6	6,9	10,1	15,1
	2	3,9	5,2	6,3	7,2	7,7	6,3
	3	2,5	3,9	6,5	6,7	—	—
1	1	2,4	3,8	5,2	7,1	10,4	—
	2	2,7	3,7	3,8	6,9	9,8	14,7
	3	2,6	3,7	3,5	5,9	12,4	10,5
2	1	4,0	4,4	4,9	11,9	8,1	13,5
	2	2,9	4,8	6,8	7,3	10,7	—
	3	3,8	5,1	7,4	10,0	8,1	7,4
3	1	3,4	4,0	4,3	12,1	12,4	13,8
	2	2,3	3,7	6,1	10,1	11,8	16,4
	3	1,8	4,7	7,5	8,4	12,6	12,2
4	1	3,6	4,8	4,2	6,3	6,4	5,8
	2	3,1	4,1	3,4	3,8	5,2	5,2
	3	3,3	3,7	4,4	6,3	6,7	—
5	1	3,8	5,0	8,5	9,5	8,6	10,9
	2	2,9	4,0	7,1	9,7	9,8	14,2
	3	3,8	6,1	7,3	10,3	12,4	9,6
6	1	4,2	5,1	6,4	7,9	7,3	9,7
	2	4,9	5,5	5,9	6,6	8,1	9,6
	3	4,0	5,3	6,6	6,0	6,9	7,4
Среднее		3,31	4,59	5,93	7,94	9,27	10,72

Как видно из табл. 2, 3, пульсация скоростей по величине свойственна продольной и вертикальной составляющим, причем она также растет по мере удаления от дна.

О пульсации скоростей в придонном слое по направлению дает представление табл. 4, в которой приведены углы наклона траекторий частиц к оси абсцисс.

Из табл. 4 видно, что извилистость пути частиц в половине случаев возрастает по мере приближения к дну. Это, очевидно, и есть результат влияния выступов шероховатости. Фейдж считает такое явление признаком возрастания турбулентности потока.

В табл. 5 приведены результаты подсчета общего количества взвешенных частиц по интервалам высоты. Таблица характеризует мутность потока в придонном слое. Из нее можно сделать выводы: 1) мутность с увеличением расстояния от дна резко падает; 2) в при-

донном слое (в целом по кадру и по отдельным зонам значения Z) отмечена флюктуация мутности.

Таблица 3

Вертикальная составляющая, осредненная по кадру, мм/сек

Номер		Высота над дном, мм					
ленты	кадра	0—0,10	0,11—0,20	0,21—0,30	0,31—0,40	0,41—0,50	0,51—0,60
0	1	0,7	1,4	2,3	1,8	2,0	3,5
	2	0,8	1,0	1,6	1,7	1,6	1,6
	3	0,9	0,8	1,5	1,7	—	—
1	1	0,8	1,2	1,6	1,6	2,7	—
	2	0,7	1,0	1,1	1,8	2,3	4,2
	3	1,0	1,1	1,2	1,6	3,1	3,2
2	1	1,0	1,0	0,9	2,5	1,6	3,6
	2	1,0	1,1	1,7	2,4	3,5	—
	3	0,5	1,0	1,6	2,9	2,2	2,1
3	1	0,9	0,9	0,9	2,1	2,6	2,4
	2	0,5	0,7	2,1	2,0	2,5	4,4
	3	0,3	0,7	1,2	1,5	2,7	2,8
4	1	0,5	1,1	0,9	1,3	1,5	1,4
	2	0,5	0,6	0,7	0,4	1,2	1,2
	3	0,2	0,6	0,7	1,7	1,4	—
5	1	0,6	0,4	1,1	1,2	1,2	1,5
	2	0,3	0,8	1,4	2,3	1,2	4,9
	3	0,9	1,4	1,8	2,0	2,4	1,7
6	1	0,9	0,8	2,7	1,1	1,0	2,0
	2	1,4	0,8	1,1	1,3	2,0	2,7
	3	0,2	0,9	1,3	1,0	1,3	1,7
Среднее		0,70	0,92	1,40	1,71	2,0	2,64

Таблица 4

Углы наклона траекторий частиц к оси абсцисс, градусы
(средние из ряда определений)

Номер		Расстояние от дна, мм					
ленты	кадра	до 0,10	0,11—0,20	0,21—0,30	0,31—0,40	0,41—0,50	0,50—0,60
2	1	39	34	10	12	11	15
	2	18	13	14	18	18	—
	3	39	49	12	16	15	16
3	1	14	13	12	10	12	10
	2	45	38	19	11	12	15
	3	7	9	9	10	12	13

Мы впервые получаем экспериментальные значения так называемой придонной мутности для слоя толщиной 0,6 мм. Применен-

ный метод позволяет установить и закон изменения мутности в пограничном слое потока, т. е. в той области, которая до сих пор была недоступна не только эксперименту, но и наблюдению.

Микрокиносъемка подтвердила, что в тонком придонном слое бывают и „трамплины“ М. А. Великанова [2] и В. Н. Гончарова [3] — легко обтекаемые препятствия, отклоняющие придонную струю потока вверх и типичные „подвалья“ с затишьем и другие явления, о наличии которых до сих пор только догадывались. Это понятно, так как масштаб всех этих явлений не превышает десятых долей миллиметра.

Таблица 5

Изменение по высоте числа взвешенных почвенных частиц
в придонном слое толщиной 0,6 мм

Номер		Высота над дном, мм						Сумма
лен- ты	кадра	до 0,10	0,11— —0,20	0,21—0,30	0,31—0,40	0,41—0,50	0,51—0,60	
0	1	28	32	18	13	8	2	101
	2	24	21	17	15	8	2	87
	3	22	27	21	9	—	—	79
1	1	12	20	15	6	10	—	63
	2	15	29	14	8	8	3	77
	3	17	29	18	8	5	2	79
2	1	14	14	13	9	4	2	56
	2	20	18	10	14	12	—	74
	3	23	11	7	11	10	3	65
3	1	16	16	11	9	7	2	61
	2	20	20	14	9	9	1	73
	3	17	18	11	14	7	4	71
4	1	21	18	9	8	10	3	69
	2	23	16	13	4	12	4	82
	3	24	23	13	4	8	—	72
5	1	25	25	13	11	13	2	89
	2	25	21	11	8	15	4	84
	3	—	—	—	—	—	—	—
6	1	18	12	12	12	8	8	70
	2	16	18	15	12	8	1	70
	3	12	16	12	11	7	5	63
Итого		402	404	267	195	169	48	1485

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для понимания наблюдавшихся явлений в придонной области можно использовать представления аэрогидродинамики о пограничном слое [9, 10, 13] и физико-химии о границе раздела фаз [5]. Первые не рассматривают химической природы твердого тела и жидкости и поэтому не могут достаточно полно объяснить явления смыва почвы. Вероятно, их объяснения процессов движения наносов в связи с руслоформированием, особенно когда речь идет о придонной области, также не всегда достаточно полные.

Остановимся на понятии о двойном электрическом слое на границе раздела фаз. Как известно, им объясняются явления электроосмоса и возникновение потенциала протекания. Величина этого потенциала зависит от скорости течения жидкости, ее ионного состава и характера обменных оснований твердой фазы. Потенциал протекания — силы Кулона — и является тем „третьим фактором“ наряду с силами Бернулли, которые помогают взвешиванию частиц почвы в потоке.

Реальность и практическая значимость этой величины не должны вызывать сомнения, так как на ней основано применение электродренажа. Кроме того, явление электризации потоком своего русла уже давно известно гидрогеологам и геофизикам. Борьба с самовозгоранием нефтепродуктов при их движении по трубам также строится на разряде потенциала протекания [1, 15].

На мысль об участии электрических сил межфазовой границы в процессе смыва почвы наталкивает поведение солонца в потоке и ряд специальных опытов, на которых не имеем возможности здесь останавливаться. В частности, только ими можно объяснить то, что соотношение сопротивлений смыву двух почв в водном потоке резко меняется в потоке керосина или с изменением скорости потока.

ВЫВОДЫ

1. Метод микрокиносъемки в лотке придонной области потока с размываемым руслом оказался пригодным для постановки наблюдений над качественной и количественной сторонами протекающих здесь процессов.

2. Установлено, что поток с размываемым руслом имеет турбулентный режим до самого дна и что здесь нет никакой ламинарной пленки. Слой прочно- и рыхлосвязанной воды имеет молекулярные масштабы, за исключением солонца, на котором он приобретает размеры, видимые в микроскоп.

3. Вблизи боковой стеклянной стенки режим течения жидкости иной — он может приближаться к ламинарному.

4. С помощью микрокиносъемки сделана попытка построения эпюры скоростей и кривой распределения мутности в придонном слое толщиной 0,6 мм.

5. В нем обнаружены так называемые местные гидравлические явления — вальцы, прыжки, подвалья и другие в масштабах долей миллиметра.

6. Выдвигается гипотеза об участии в процессе смыва почв (а возможно и движения наносов) сил Кулона, в частности потенциала протекания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амирханова Х. И., Ростомьянц П. М., Шахназаров И. Л. О влиянии режима течения нефтепродуктов на электризацию, Изв. АН АзССР, 1945, № 10.
2. Великанов М. А. Движение наносов, М., Гидрометиздат, 1948.
3. Гончаров В. Н. О взвешивании наносов, М., Госстройиздат, 1933.
4. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков, М., Гидрометиздат, 1954.
5. Григоров О. Н. Электрокинетические явления и электролиз, Сб. „Современные методы исследования физико-химических свойств почв“, М., АН СССР, 1948.

6. Гуссак В. Б. Некоторые наблюдения над эрозией почв в пограничном слое с помощью микрокино съемки, "Почвоведение", 1948, № 7.
 7. Гуссак В. Б. Некоторые вопросы методики и техники лабораторных исследований эродируемости почв, "Почвоведение", 1950, № 5.
 8. Замарин Е. А. О ламинарной пленке в гидравлике, "Гидротехника и мелиорация", 1953, № 4.
 9. Леви И. И. Динамика русловых потоков, М., Техиздат, 1948.
 10. Левин В. Г. Физико-химическая гидродинамика, М., АН СССР, 1952.
 11. Лосневский А. И. О природе взвешивающей силы, "Водный транспорт", 1923, № 2.
 12. Лосневский А. И. Лабораторные исследования движения донных наносов, Труды ЦНИИ водного транспорта, М., Наркомвод СССР, 121, 1934.
 13. Лойцянский Л. Г. Аэродинамика пограничного слоя, М., Гостехиздат, 1941.
 14. Ребиндер П. А., Шрейнер Л. А., Жигач К. Ф. Понижители твердости в бурении, Сб., "Физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении", М., АН СССР, 1944.
 15. Сергеев Л. А. К вопросу о механизме электризации при турбулентности, Изв. АН. АзССР, отд. физ-техн. наук и нефти, 1946, №4, стр. 46—50.
 16. Фидман Б. А. О влиянии шероховатости стенок на структуру турбулентного потока, Изв. АН СССР, сер. геогр. и геоф. наук, 1948, т. XII, № 3.
 17. Fage A., Townsend H. An examination of Turbulent Flow with an Ultramicroscope, Proc. Roy. Soc., 1932, v. 135.
 18. Poiseuille V. Memoirs de savants etrangers, 7, 1841.
 19. Sekera V. Beobachtung über die Microerosion des Bodens, Z. Pfl. D. B., 55, 100, 1952.
-

М. П. КУЗЬМИНОВ

ДЕФОРМАЦИЯ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБОВ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ И ТЕМПА ЗАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА

Опыт строительства и эксплуатации земляных гидротехнических сооружений показал, что мы не располагаем достаточными данными о деформациях тела плотины, основания и бортов в процессе заполнения водохранилища водой. Отсутствуют нормативы скорости и величины слоя заполнения.

Все это ставит вопрос о необходимости подробных исследований в данном направлении.

Деформации имеют функциональную зависимость главным образом от способов производства работ, конструкций плотин, инженерно-геологических условий и темпа заполнения водохранилища, напорного бассейна и канала водой. От него зависит устойчивость земляного сооружения. В процессе заполнения водохранилища с учетом свойств грунтов плотины, основания и бортов должна наступить фильтрационная устойчивость. В случае нарушения этих условий могут произойти деформации в виде выпора, суффозии и размыва, влекущие за собой аварии.

Конструкции и подбор фильтров дренажных призм плотины также способствуют фильтрационной устойчивости земляного сооружения. Поэтому мы провели исследования деформации различных грунтов оснований шести земляных сооружений в период заполнения водохранилища водой и далее в период эксплуатации при идентичных способах производства работ.

На рис. 1 изображена схема расположения водохранилища и плотин, возведенных методом отсыпки грунта в воду.

Головная плотина № 6 построена на канале, остальные пять — в логах, образующих водохранилище. Их конструктивные элементы приведены в табл. 1.

В проекте организации производства работ по возведению плотин методом отсыпки грунта в воду предусматривалось, что строительная площадка должна быть разбита на участки 15×15 м с ограждающими валиками высотой 1 м и наполнением воды 0,5 м. Фактически участки устраивались 30×30 и 30×40 м с высотой ограждающих валиков 1,8 м при наполнении водой 0,7—0,9 м (головная плотина). Грунт в карьере разрабатывался экскаваторами и транспортировался до места укладки автосамосвалами. Устройство ограждающих валиков и засыпка грунта в воду производились бульдозерами. Для равномерного увлажнения нижележащего, ранее уложенного грунта верхний слой

(толщиной 15—20 см), уплотнившийся под давлением гусениц трактора, снимался и укладывался в валики.

Вода подавалась на делянки по трубопроводу специальной насосной установкой.

Таблица 1

Номер плотины	Высота, м	Ширина по верху, м	Заложение откосов	
			верхового	низового
1	6,8	12,0	1:4,0	1:3,0
2	10,5	12,0	1:4,0	1:3,0
3	20,5	12,0	1:4,5	1:4,0
4	19,5	12,0	1:4,5	1:4,0
5	9,8	12,0	1:4,0	1:3,0
Головная				
6	36,5	12,0	1:3,5 1:4,0	1:3,5 1:4,0

Таблица 2

Номер плотины	Стоимость 1 м ³ грунта, руб.				
	разработка	транспорт	отсыпка в воду	вода	всего
1	2,04	4,10	1,08	—	7,22
2	2,04	5,45	1,10	0,10	8,69
3	2,04	3,43	1,26	0,07	6,80
4	2,04	3,30	1,12	0,07	6,53
5	2,70	—	1,23	—	3,93
Головная					
6	2,04	3,55	1,11	0,03	6,73

Примечание. По плотинам № 1 и 2 дальность возки составляет 7—8 км, поэтому и стоимость транспортирования выше.

Стоимость 1 м³ грунта, уложенного в плотины методом отсыпки в воду при полной комплексной механизации, характеризуется данными табл. 2.

Физико-механические свойства грунтов, уложенных в плотины методом отсыпки грунта в воду, показывают данные табл. 3.

Таблица 3

Номер плотины	Гранулометрический состав частиц, %			Характерная влажность, %		
	2,00—0,05 мм	0,05—0,005 мм	<0,005 мм	нижний предел текучести	нижний предел пластичности	число пластичности
3	31,55	57,15	11,30	25,74	17,98	7,76
4	41,19	49,79	9,02	25,05	17,33	7,23
5	37,42	54,42	8,16	24,68	17,17	6,91
Головная						
6	50,60	39,70	9,70	24,52	17,02	7,50

Ниже приводятся величины объемного веса скелета и влажности грунта при полной комплексной механизации работ:

Номер плотины	Весовая влажность, %	Объемный вес, т/м ³
2	19,5	1,60
3	21,5	1,59
4	19,0	1,61
5	16,2	1,70
Головная		
6	18,2	1,63

Из этих данных видно, что грунты, уложенные в плотины, находятся на пределе пластичности (от 16,2 до 21,5%).

Опыт строительства плотин показал, что грунты, уложенные в воду механизированной отсыпкой, значительно плотнее (1,59—1,71 т/м³) тех, которые уложены ручной отсыпкой на других объектах (где максимальный объемный вес—1,53 т/м³).

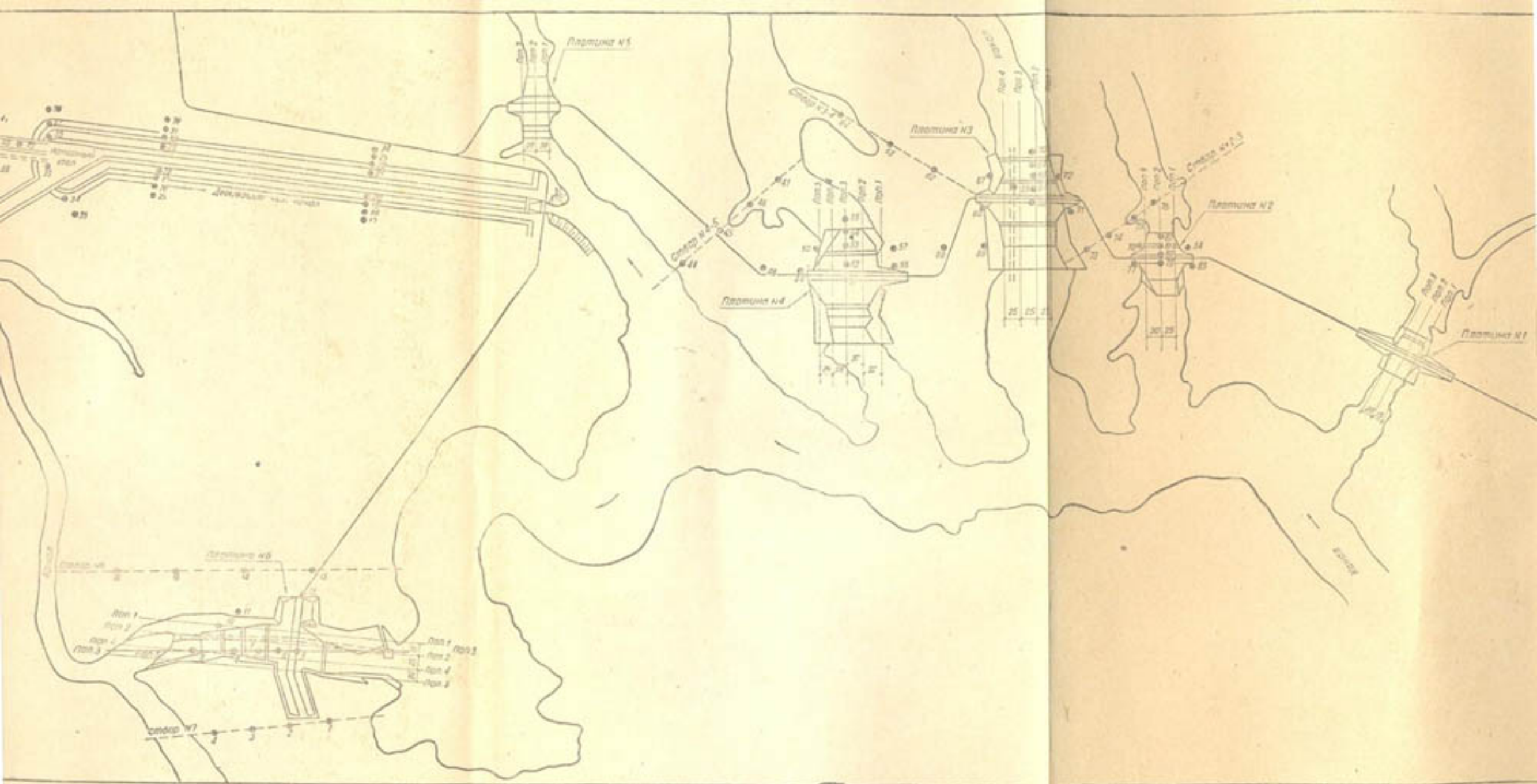


Рис. 1. Схема расположения гидротехнических сооружений с показанием пьезометров и реперов.

Следовательно, комплексная механизация производства работ не только экономичнее, но и позволяет делать возводимые плотины значительно устойчивее.

Основания под плотинами слагаются из суглинков и супесей мощностью до 5 м. Глубже, от 1,5 до 5,0 м, залегает песчано-гравелистый слой различной степени цементации; борта — лессовидные суглинки и супеси.

Рис. 2 иллюстрирует темп заполнения водохранилища, колебание горизонта фильтрующих вод плотин и бортов. Из графика видно, что с 17 марта по 30 июня 1956 г. (за 105 суток) горизонт воды в водохранилище поднялся на 23,5 м (темп наполнения составил в среднем 22,4 см/сутки). С 30 июня по 5 ноября 1956 г. (за 128 суток) горизонт воды в водохранилище повысился на 62 см. Одновременно под воздействием фильтрующего потока в сжимаемой среде с переменной пористостью и проницаемостью наблюдалась деформация (уплотнение) земляных сооружений.

Величины деформации плотин приводятся в табл. 4.

Таблица 4

Номер плотины	Деформация с 1. XI 1956 г. по 25. II 1958 г., см			
	напорного откоса	гребня	низового откоса	к высоте, %
2	до 53	до 36	до 57	3,40
3	„ 55	„ 34	„ 88	1,66
4	„ 93	„ 46	„ 74	2,35
5	„ 33	„ 28	„ 52	2,85
Головная 6	„ 60	„ 47	„ 50	1,29

При анализе можно заметить, что деформация напорного и низового откосов всех плотин больше, чем у гребня. Поперечные профили плотин, расположенные ближе к бортам, деформируются больше, чем у центра.

Данные деформации бортов приводятся ниже:

Номер створа	Деформация с 1. XI 1956 г. по 25. II 1958 г., см
3—4	до 65
4—5	„ 51
6	„ 21
7	„ 97

Для обобщения наблюдений проследим за процессами на ряде объектов.

Рассматриваемая плотина возведена методом отсыпки грунта в воду. Горизонт воды в верхнем бьефе повышался с 19 по 30 марта 1944 г. и за 21 сутки поднялся на 11,92 м (темп заполнения 57 см/сутки). С 1 по 8 сентября 1944 г. горизонт поднят на 3,6 м (45 см/сутки).

В процессе заполнения реперы на верховом откосе дали осадку от 2 до 20 мм, глубинные реперы дали осадку до 50 мм. Величина деформации низового откоса плотины характеризуется данными табл. 5.

Следовательно, величина осадки в первый год эксплуатации (1944—1945 гг.) колеблется от 38,5 до 81% от величин осадки за весь рассматриваемый период (1944—1955 гг.). По плотине, возведенной методом послойной укатки, сведения о темпе заполнения водохранилища

приводятся в табл. 6. Многолетние наблюдения свидетельствуют о том, что среднегодовой темп заполнения водохранилища колеблется от 4 до 7 см/сутки, а среднемесячный от 6,5 до 20 см/сутки.

Таблица 5

Номер репера	Осадка по годам, мм		Осадка с 1944 по 1945 г., % к общей деформации
	1944—1945	1944—1955	
158	21	42	50,0
159	43	90	46,7
160	45	82	56,0
161	0	26	—
164	20	20	—
165	50	79	63,2
166	57	64	89,0
167	40	47	85,0
175	32	83	38,5
177	25	57	44,0
178	51	82	62,0
179	49	91	54,0
180	56	79	71,0
181	49	77	64,0
182	51	87	58,5
183	60	94	64,0
184	59	88	67,0
185	68	96	71,0
186	110	133	82,5
187	85	112	76,0

Следует отметить, что до 1951 г. систематических наблюдений за деформацией плотины не проводилось. Поверхностные реперы были

Таблица 6

Год	Темп заполнения водохранилища, см/сутки	
	среднемесячный	максимальный
1945	6,1	7,2
1946	2,7	6,5
1947	4,2	12,0
1948	7,1	17,5
1949	4,0	9,5
1950	5,3	20,0

установлены только 1 июля 1950 г., поэтому точными данными о деформациях основания, бортов и плотины в период заполнения водохранилища мы не располагаем.

Осадочные явления характеризуют данные табл. 7.

Таким образом, в период заполнения водохранилища (1945—1950 гг.) процесс деформации идет интенсивно (осадка основания под давлением + усадка тела плотины). В последующий период этот процесс постепенно затухает.

Данные о деформации сооружений и темпе заполнения водохранилища с учетом геологических условий приводятся в табл. 8.

Данные табл. 8 говорят о том, что величина деформации плотин в основном зависит от способа производства работ. В процессе строительства плотин методом отсыпки грунта в воду при заполнении де- лянок происходила осадка основания и вода направлялась к бортам для полной их замочки.

При такой технологии возведения происходили основные процессы осадки основания и просадка бортов.

Изучив природные условия местности, применяя прогрессивные способы производства работ, можно не только предотвратить аварии, но и довести до минимума деформации земляных сооружений.

Для лессовидных, особенно просадочных грунтов, способ производства отсыпкой в воду при комплексной механизации является наи-

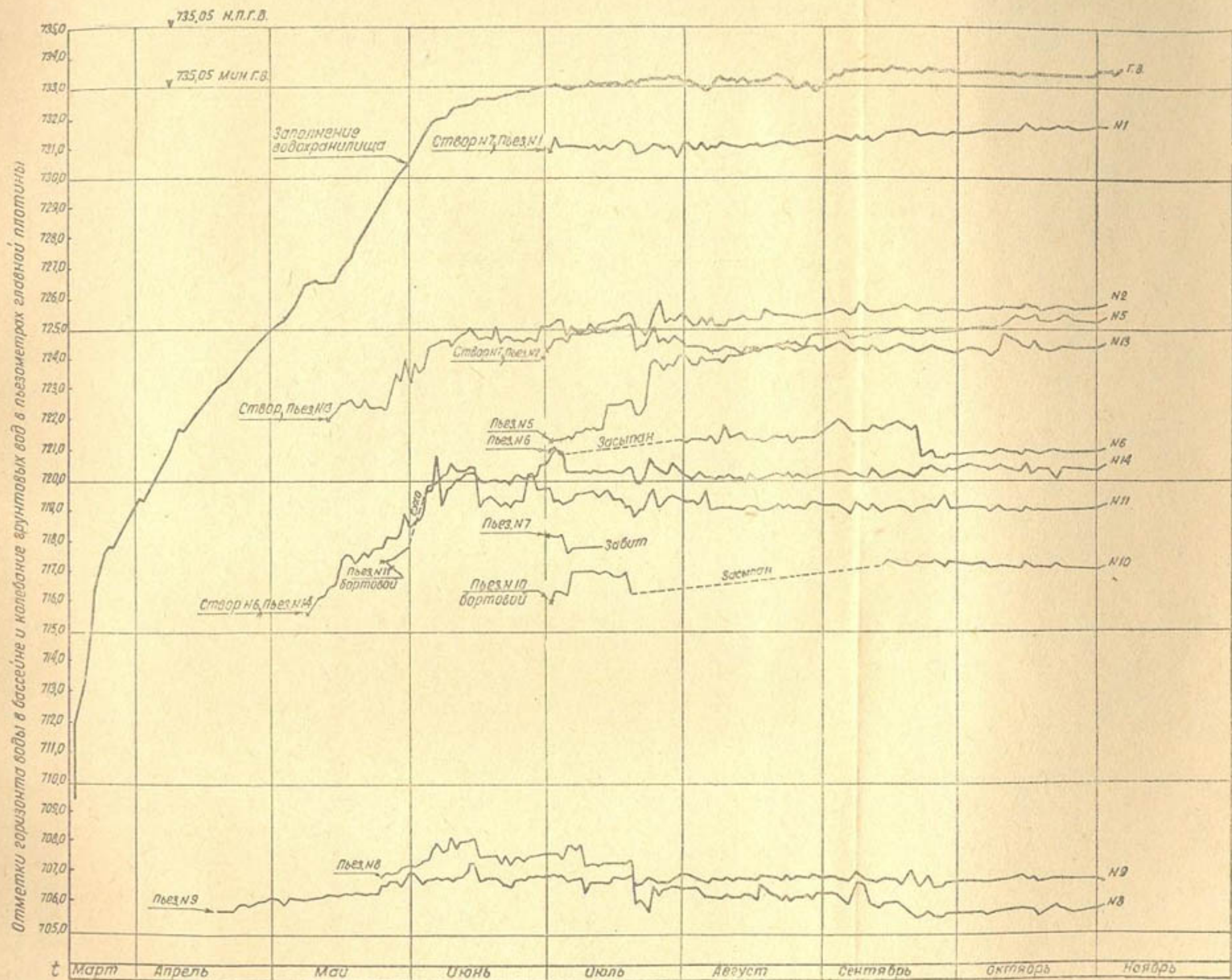


Рис. 2. Темп заполнения водохранилища и колебания фильтрующих вод в пьезометрах головной плотины.

более рациональным, так как в процессе возведения происходят основные просадочные и осадочные явления, что значительно повышает устойчивость сооружения в период эксплуатации.

Таблица 7

Номер репера	Пикет	Величина осадки, мм по годам			Суммарная деформация, %
		1952	1955	суммарно	
27	12+00	337	80	417	80
27	12+00	312	150	462	67
36	16+00	413	310	723	57
60	16+00	173	60	233	74
35	20+20	245	90	335	73
32	25+00	176	50	226	78
	30+00	417	110	527	79

Сведений, полученных в результате исследований, проведенных по трем объектам, конечно, недостаточно для широкого обобщения, однако они позволяют предварительно рекомендовать следующее:

1) темп заполнения водохранилища регулировать в зависимости от способа производства работ, конструктивных элементов и геологических условий. (В условиях лессовидных грунтов возможны такие темпы заполнения водохранилища: для плотин, возведенных укаткой, — от 6 до 8 см/сутки, отсыпкой в воду — до 25 см/сутки);

Таблица 8

Номер плотины	Высота плотины, м	Метод возведения плотины	Объемный вес уложенного грунта, т/м ³	Состав грунта		Темп заполнения водохранилища, см/сутки	Осадка к высоте плотины, %
				основания	бортов		
1	27,0	Отсыпка грунта в воду (ручная)	1,53	Мергель	Суглинки	50,0	0,20
3	20,5	Отсыпка грунта в воду (механизированная)	1,59	Суглинки с линзами песка и гравия	Супеси и суглинки	22,4	0,34
5	9,8	.	1,70	.	.	22,4	0,42
Головная 6	36,5	.	1,63	Мергель	.	22,4	0,27
Плотина водохранилища	28,8	Укатка	1,75	Суглинки	Суглинки	5,0	1,46

2) тщательно наблюдать за состоянием плотин в местах стыка с бортами. (В случае образования трещин последние необходимо заделывать заливкой пульпой густой консистенции (1:2);

3) наблюдать за кривой депрессии в плотинах и бортах по пьезометрам. (В случае поднятия уровня фильтрационных вод, снижающих устойчивость плотин, нужно очистить дренажную призму от закольматированного грунта);

4) наблюдать за деформацией плотин, бортов и основания, нивелируя глубинные и поверхностные реперы. (В случае оползневых явлений низовых откосов плотин или бортов надо произвести пригрузку из гравийного материала в виде наклонного тюфяка толщиной 50 см, который должен соединяться с основной дренажной призмой нижнего бьефа);

5) следить за расходом и отводом фильтрационных вод.

И. А. ШНЕЕР

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЕСЧАНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Гидромеханизированный способ возведения сооружений широко внедряется в практику ирригационного и гидроэнергетического строительства. Для обеспечения устойчивости земляного сооружения необходимо достичь значительной плотности намывного грунта. Однако влияние технологии намыва на плотность песка изучено мало.

СТРУКТУРА ВОЛНОВЫХ НАНОСОНЕСУЩИХ ПОТОКОВ

При малой концентрации в потоке возможно прямое грядовое движение наносов, которое мало влияет на его структуру. Но при значительном насыщении взвесью поток, будучи все еще текучим и турбулентным, приобретает новое качество. Перемещение наносов требует значительных затрат энергии и большого гидравлического уклона. Возрастающая при этом скорость v переходит через предел и в потоке возникает бурный режим ($\frac{v^2}{gh} > 1$). При этом поток приобретает свойство образования резких деформаций поверхности (волн) перед преградами.

Наблюдения структуры потока мы проводили при намыве Каховской, Кайрак-Кумской, Куйбышевской и других земляных плотин. Было установлено, что в потоках гидросмеси волновая структура возникала, когда концентрация твердой фазы достигала нескольких процентов по весу. Наблюдения показали, что при небольшом гидравлическом уклоне и малой концентрации поток состоит из ряда последовательных остановившихся волн зыби. С увеличением уклона и концентрации увеличивается перепад между последовательными волнами и высота волн, которые, наконец, разбиваются, образуя гидравлические прыжки с вальцом. Это происходит при значении числа Фруда $F=2$. В гребне каждой волны после прыжка образуется зона интенсивного турбулентного перемешивания.

Наносы взмучиваются в гидравлическом прыжке, переносятся во взвешенном состоянии и частично выпадают в осадок в конце зоны турбулентного перемешивания, а частично проносятся далее по скату волны вниз во впадину следующей волны. Продольная скорость течения в гребне v_2 мала, а глубина h_2 значительно превышает среднюю глубину потока. Гидравлический режим ската и впадины волны значительно спокойнее, хотя продольная скорость v_1 увеличивается в несколько раз, а глубина h_1 уменьшается; движение здесь почти

параллельно-струйное, наносы перемещаются в придонном слое и волоком по дну, поток осветляется.

Некоторые теоретические обобщения. Рассматриваем волновой наносонесущий поток, находящийся в бурном режиме (рис. 1). Поскольку скорость потока превзошла критический предел ($v > \sqrt{gh}$), то поток приобрел свойство образования волн перед преградами —

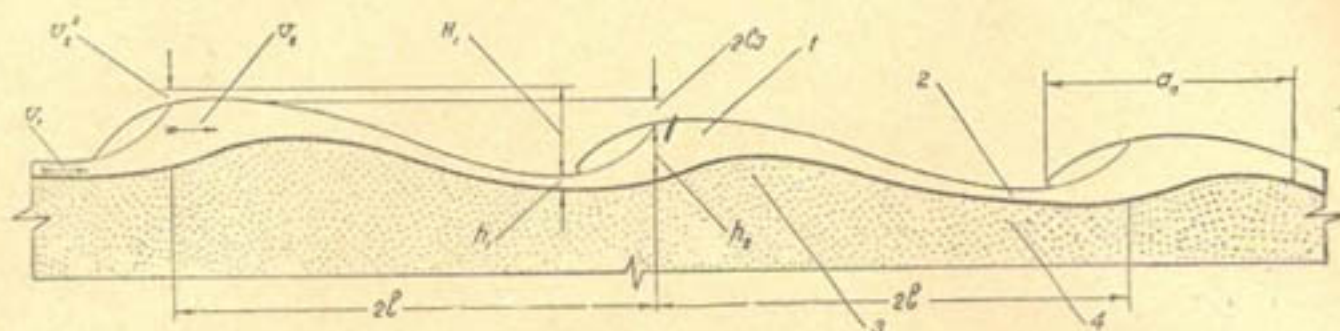


Рис. 1. Схема волнового потока в разрезе:

1 — гребень волны; 2 — впадина волны; 3 — рыхлый песок; 4 — плотный песок; $2l$ — длина волны; a_n — длина зоны повышенной турбулентности.

перед грядами своих наносов. Для определения быстроты перемещения волны вверх по потоку v_n используем уравнения количества движения и количества воды в гребне и во впадине волны. В результате находим быстроту перемещения волны в следующем виде (формула Сен-Венана) [1]:

$$v_n = \sqrt{g \frac{h_2}{2h_1} (h_2 + h_1)}, \quad (1)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Волна может остановиться в том случае, если быстрота ее перемещения вверх по течению равна скорости течения потока в сжатом сечении v_1 , $v_1 = v_n$.

Выражаем скорость через удельный расход смеси q , $\text{м}^3/\text{сек}$, —

$$v_1 = \frac{q}{h_1}, \quad (2)$$

а расход — через критическую глубину h_k —

$$q = \sqrt{gh_k^3}. \quad (3)$$

Тогда относительная скорость перемещения остановившейся волны равна

$$v_n = \frac{\sqrt{gh_k^3}}{h_1}. \quad (4)$$

Из уравнений (1) и (4) следует соотношение между глубинами во впадине волны и под ее гребнем

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right]. \quad (5)$$

Длину волны обозначим в метрах через $2l$. Зная скорость ее перемещения, можно определить частоту колебаний ω в секунду

$$\omega = \frac{v_n}{2l},$$

или

$$2l = \frac{v_n}{\omega} = \frac{1}{\omega} \frac{\sqrt{gh_k^3}}{h_1}. \quad (6)$$

При изменении глубины потока будет меняться и длина волны. Из теории волн, распространяющихся на малой глубине, известно, что частота волны сохраняется при этом постоянной.

Размеры элементов волны определяются гидравлическим уклоном I и удельным расходом наносонесущего потока, а в конечном счете — концентрацией твердой фазы. Здесь имеется в виду средний уклон волнового потока, т. е. уклон линии, проведенной через одноименные точки волны (гребни). Связь элементов волны с уклоном можно выявить по рис. 1:

$$H_1 = h_2 - h_1 + 2l + \frac{v_2^2}{2g}, \quad (7)$$

где $2l$ — гидравлические потери на длине одной волны,
 H_1 — напор, формирующий скорость в сжатом сечении,

$$H_1 = \frac{v_1^2}{\varphi^2 2g},$$

φ — коэффициент скоростных потерь на скате, значение которого в данном случае равно 0,85.

Преобразуем уравнение (7):

$$2l = \frac{q^2}{h_1^2 \varphi^2 2g} - h_2 + h_1 - \frac{q^2}{h_2^2 2g}. \quad (8)$$

Гидравлический уклон потока гидросмеси

Гидравлические параметры наносонесущего потока при нестационарном режиме определяются следующей закономерностью [3]:

$$-\frac{dq_T}{dx} = \frac{\omega \rho_m}{r} \left(1 - \frac{\rho_m}{\gamma_T}\right) - \frac{c v_m I (\gamma_{ж} + \delta \rho_m)}{r \delta}, \quad (9)$$

где ρ_m — суммарная мутность всех фракций, $т/м^3$;

v_m — средняя скорость течения, $м/сек$;

ω — средняя гидравлическая крупность наносов, $м/сек$;

$$\delta = \frac{\gamma_T - \gamma_{ж}}{\gamma_T};$$

γ_T — удельный вес твердой фазы, $т/м^3$;

$\gamma_{ж}$ — удельный вес жидкой фазы, $т/м^3$;

$c=0,204$ — постоянный коэффициент из опытных данных;

q_T — удельный твердый расход;

x — расстояние от выпуска, $м$.

Известно, что в условиях бурного режима средняя скорость течения в квадрате пропорциональна гидравлическому уклону и

глубине

$$v_m = \frac{1}{k_1} \sqrt{ghI}, \quad (10)$$

где h — средняя глубина потока.
Находим отсюда среднюю глубину

$$h = \frac{q^{\frac{2}{3}} k_1^{\frac{2}{3}}}{g^{\frac{1}{3}} I^{\frac{1}{3}}}. \quad (11)$$

Из уравнения (9) с учетом (10) и (11) находим значение гидравлического уклона

$$I = \frac{\frac{3}{8^4} \frac{1}{k_1^2} \frac{3}{w^4}}{\frac{3}{c^4} \frac{1}{g^4} \frac{1}{q^4}} \left[\frac{\rho_m \left(1 - \frac{\rho_m}{\gamma_r}\right) - r \frac{dq_r}{dx}}{(\gamma_{ж} + \rho_m)} \right]^{\frac{3}{4}}. \quad (12)$$

Как видно из уравнения, уклон потока при осаждении в нем наносов меньше уклона в стационарных условиях (величина $\frac{dq_r}{dx}$). Для случая двустороннего намыва и одинаковой интенсивности его путем интегрирования уравнения баланса твердого расхода показано [3], что величина $\frac{dq_r}{dx}$ выражается через начальную концентрацию ρ_0 и длину отложений L по формуле

$$\frac{dq_r}{dx} = \rho_0 q \frac{1-\beta}{L},$$

где β — отмыв грунта в долях единицы.

Лишь при длинном пляже этой величиной можно пренебречь.

Удобно заменить мутность через весовую концентрацию p :

$$p = \frac{\text{вес твердой фазы}}{\text{вес жидкой фазы}} = \frac{\rho_m}{\left(1 - \frac{\rho_m}{\gamma_r}\right) \gamma_{ж}}.$$

Упростим выражение (12), опустив сомножитель в скобках в числителе и величину $\frac{dq_r}{dx}$ с ошибкой в практических случаях не более 10%:

$$I = \frac{\frac{3}{8^4} \frac{1}{k_1^2} \frac{3}{w^4}}{\frac{3}{c^4} \frac{1}{g^4} \frac{1}{q^4}} \left[\frac{p}{1+p} \right]^{\frac{3}{4}}. \quad (13)$$

Для случая двустороннего намыва плотины показано [3], что суммарная концентрация твердой фазы при движении гидросмеси от выпуска к прудку на оси плотины уменьшается по линейному закону:

$$p = \rho_0 \left[1 - \left(1 - \beta \right) \frac{x}{L} \right],$$

где ρ_0 — начальная концентрация у выпуска в долях единицы.

Формула гидравлического уклона для двустороннего способа намыва записывается, следовательно, так:

$$I = \frac{\frac{3}{8} \frac{1}{k_1^2} \frac{3}{w^4}}{\frac{3}{c^4} \frac{1}{g^4} \frac{1}{q^4}} \left\{ \frac{v_0 \left[1 - (1 - \beta) \frac{x}{L} \right]}{1 + p_0 \left[1 - (1 - \beta) \frac{x}{L} \right]} \right\}^{\frac{3}{4}}. \quad (14)$$

Средняя гидравлическая крупность w определяется из расчета фракционирования [3].

Зона турбулентного перемешивания. Повышенную кинетичность в зоне после прыжка характеризует удельная кинетическая энергия, пропорциональная квадрату вертикальной составляющей скорости. Для определения вертикальной скорости используем формулу Н. А. Преображенского для амплитуды пульсаций давлений на дне A в зоне после прыжка [2]:

$$\frac{A}{h_k} = 1,6 F^{\frac{3}{2}} \left(\frac{a}{h_k} \right)^{-\frac{4}{3}}, \quad (15)$$

где a — расстояние от сжатого сечения, м;

F — число Фруда, которое в нашем случае выражается так:

$$F = \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3. \quad (15')$$

Формула показывает, что амплитуда пульсаций давлений быстро уменьшается с удалением от прыжка. В конце первой волны возникает новый водяной прыжок, создающий новые пульсации гидродинамических величин. Распространившиеся же сюда пульсации от предыдущих структурных форм накладываются на спектр частот с запаздыванием фаз и являются здесь колебаниями второго порядка малости и более высокой частоты. В расчетах учитываем только колебания низких частот (макροструктура) на длине одной волны.

Амплитуда пульсаций давлений, очевидно, пропорциональна квадрату вертикальной составляющей скорости:

$$\overline{u^2} = c_3 2gA,$$

(черта сверху означает осреднение по времени) —

$$\overline{u^2} = c_3 2g \cdot 1,6 \cdot F^{\frac{3}{2}} h_k^{\frac{7}{3}} a^{-\frac{4}{3}}. \quad (16)$$

Определим простираение зоны повышенного турбулентного перемешивания, т. е. длину участка, на котором вертикальная составляющая скорость снижается до значения, нормального для доволновых потоков.

В доволновых потоках „нормальная“ среднеквадратичная вертикальная составляющая скорости $\sqrt{\overline{u_n^2}}$, как установлено опытами Е. М. Минского и С. Ф. Савельева, пропорциональна продольной скорости, т. е.

$$\sqrt{\overline{u_n^2}} = kv.$$

В нашем случае

$$\sqrt{\overline{u_n^2}} = kv_2 = k \frac{q}{h_2},$$

или

$$\overline{u_n^2} = k^2 \frac{g h_k^3}{h_2^2}. \quad (17)$$

Значение коэффициента k мало меняется и находится в пределах 0,05—0,20.

Длину зоны турбулентного перемешивания a_n определяем из формулы (16), приняв в ней $\overline{u^2} = \overline{u_n^2}$, согласно (17):

$$a_n = \frac{(c_3 \cdot 2 \cdot 1,6)^{\frac{3}{4}} F^{\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}}}{k^{\frac{3}{2}} h_k^{\frac{1}{2}}},$$

в относительных величинах —

$$\frac{a_n}{2l} = \frac{(c_3 \cdot 2 \cdot 1,6)^{\frac{3}{4}} F^{\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}}}{k^{\frac{3}{2}} h_k^{\frac{1}{2}} 2l}. \quad (18)$$

Чтобы найти зависимость числа Фруда и глубины от гидравлического уклона, обратимся к рис. 1 и формуле (8), из которой с учетом (15') следует

$$(2l)^{\frac{13}{16}} = \frac{F^{\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}} h_1^{\frac{3}{16}}}{h_k^{\frac{7}{8}}} \left\{ \left[\frac{F^{\frac{2}{3}}}{2\varphi^2} + \frac{1}{F^{\frac{1}{3}}} - \frac{\sqrt{1+8F}-1}{2F^{\frac{1}{3}}} - \frac{2F^{\frac{2}{3}}}{(\sqrt{1+8F}-1)^2} \right]^{\frac{13}{16}} \times \right. \\ \left. \times \frac{F^{\frac{1}{16}} 2^{\frac{3}{2}} F^{\frac{1}{2}}}{F^2 (\sqrt{1+8F}-1)^{\frac{3}{2}}} \right\}. \quad (19)$$

Это уравнение не разрешается относительно F . Но можно показать, что выражение в правой части уравнения в фигурных скобках мало меняется при изменении числа Фруда в пределах 2—8, которые обычно и бывают в русловых потоках. В этих пределах выражение в фигурных скобках можно принять постоянным и равным 0,22 (безразмерная величина). Таким образом, для практических решений используем приближенное значение уравнения

$$(2l)^{\frac{13}{16}} = \frac{F^{\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}} h_1^{\frac{3}{16}}}{h_k^{\frac{7}{8}}} \{0,22\}. \quad (20)$$

Полученное значение числа Фруда и глубины $h_2 \left(F^{\frac{1}{2}} h_2^{\frac{3}{2}} \right)$ подставляем в уравнение (18) с учетом (6):

$$\frac{a_n}{2l} = \frac{(c_3 2 \cdot 1,6)^{\frac{3}{4}} \omega^{\frac{3}{16}} h_k^{\frac{3}{32}} l^{\frac{13}{16}}}{k^{\frac{3}{2}} 0,22 g^{\frac{3}{32}}}. \quad (21)$$

Гидравлический уклон зависит, согласно (13), от концентрации твердой фазы. Подставляем (13) в (21) с учетом (3):

$$\frac{a_n}{2l} = \frac{(c_3 2 \cdot 1,6)^{\frac{3}{4}} \omega^{\frac{3}{16}} q^{\frac{1}{16}} \delta^{\frac{39}{64}} k_1^{\frac{13}{64}} w^{\frac{39}{64}}}{k^{\frac{3}{2}} 0,22 g^{\frac{3}{32}} c^{\frac{4}{64}} g^{\frac{13}{64}} q^{\frac{13}{64}}} \left(\frac{p}{1+p} \right)^{\frac{39}{64}}. \quad (22)$$

Объединяем все коэффициенты в один c_4 :

$$\frac{a_n}{2l} = c_4 \frac{\omega^{\frac{3}{16}} \delta^{\frac{39}{64}} w^{\frac{39}{64}}}{g^{\frac{21}{64}} q^{\frac{7}{64}}} \left(\frac{p}{1+p} \right)^{\frac{39}{64}}. \quad (23)$$

Запишем упрощенное выражение для относительной длины зоны повышенной турбулентности:

$$\frac{a_n}{2l} = c_4 \sqrt{\frac{\delta w p}{g^{\frac{1}{3}} q^{\frac{1}{3}} (1+p)}}, \quad (24)$$

то же — для двустороннего способа намыва —

$$\frac{a_n}{2l} = c_4 \sqrt{\frac{\delta w_{cp} p_0 \left[1 - (1-\beta) \frac{x}{L} \right]}{g^{\frac{1}{3}} q^{\frac{1}{3}} \left\{ 1 + p_0 \left[1 - (1-\beta) \frac{x}{L} \right] \right\}}}. \quad (25)$$

Значение коэффициента c_4 корректируется опытными данными.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ПЕСКА

Чтобы плотно упаковать зерна, т. е. уложить песок с возможно малой пористостью, необходимо, чтобы одни зерна полностью или частично вместились в поровое пространство между другими. Для каждого осаждаемого зерна имеется некоторое оптимальное для упаковки положение, в котором оно в большей степени заполнит поровое пространство осевших зерен: в одно из больших углублений дна между осевшими зернами это зерно углубится в большей степени, или оно должно повернуться таким образом, чтобы его удлиненная часть внедрилась в узкую пору между ранее осевшими зернами, и т. п.

При осаждении в стоячей воде или в воде, текущей со скоростями, меньшими непереводимой скорости, зерна песка движутся под действием силы тяжести вертикально вниз и, встретив уже осевшие зерна на дне, останавливаются (рис. 2, а). При этом зерна далеко не всегда занимают положение, оптимальное для упаковки, поскольку нет сил, которые заставили бы их выбрать оптимальное положение. Попад на дно, зерно останавливается в первом небольшом

углублении или, зацепившись за выступы неподвижных зерен, перекрывает поровое пространство между ними. Таким образом, в тиховоди зерна песка укладываются с беспорядочной ориентацией и без упаковки, вследствие чего здесь формируются относительно рыхлые отложения песка.

Следовательно, при намыве подводным способом, когда скорость гидросмеси быстро гасится, образуются рыхлые отложения.

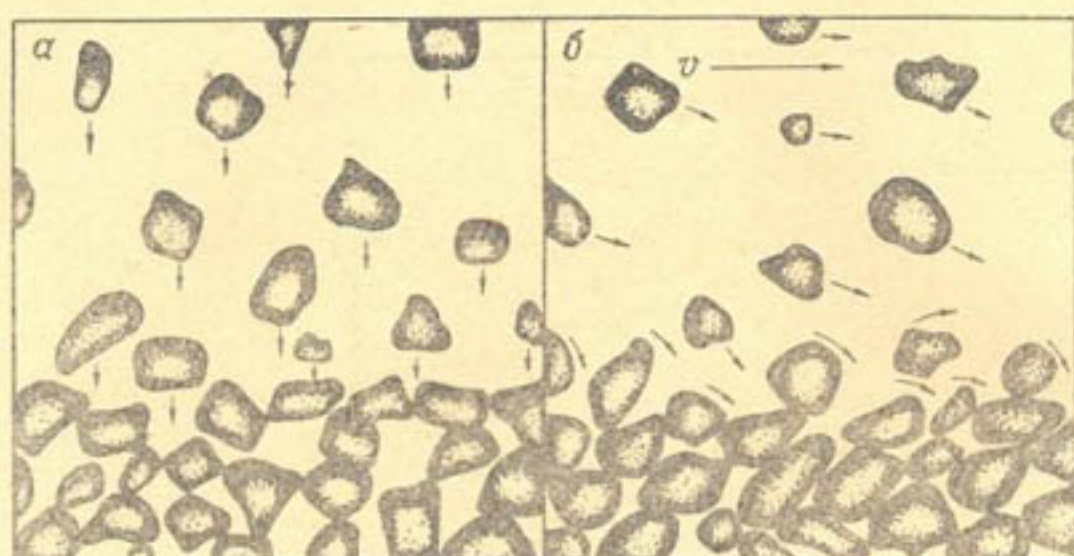


Рис. 2. Образование отложений песка в тиховоди (а) и в текущей воде (б).

v — скорость течения воды; малая стрелка — направление движения песчинок при осаждении.

Рыхлая укладка зерен имеет место и при быстром выпадении их большими скоплениями в стесненных условиях, когда зерна песка мешают друг другу занять оптимальное положение и своевременно внедриться в поровое пространство песка. При массовом выпадении зерна песка беспорядочно нагромождаются друг на друга, образуя отложения с высокой пористостью. Это подтвердилось при наших экспериментальных исследованиях плотности песка, намывтого подводным способом, когда была получена относительная плотность 0,19 [4].

Лучшие условия для плотной упаковки зерен имеются при неинтенсивном осаждении песка в плавноизменяющихся русловых потоках, текущих со значительными продольными скоростями, близкими к критическим (рис. 2, б). При первом соприкосновении с неподвижными зернами дна осаждающееся зерно еще не останавливается, поскольку на него действует, кроме силы тяжести, сила лобового давления потока, которая перемещает зерно качением или мелкими скачками далее. При качении зерно несколько раз попадает в углубления дна, не задерживаясь в них. И лишь попав в одно из наибольших углублений между неподвижными зернами или внедрившись, наконец, своей удлиненной частью в поровое пространство между осевшими зернами, оно останавливается, поскольку в этом устойчивом положении способно оказать достаточное сопротивление лобовому давлению воды. В результате в плавноизменяющемся потоке формируются относительно плотные отложения. Поскольку при надводном способе намыва наносонесущий поток бывает плавноизменяющимся лишь при небольшой концентрации, то при намыве песка надводным способом с малой концентрацией и будут формироваться плотные отложения песка.

Наносонесущие потоки при значительной концентрации твердой фазы приобретают волновую структуру. Формирование отложений песка происходит не одинаково в различных зонах волны. В сжатой струе впадины волны турбулентное перемешивание невелико, и песок перемещается в придонном слое или волоком по дну. Зерна песка в момент осаждения закатываются в понижения и в поровое пространство между ранее остановившимися зернами, укладываясь с оптимальной для упаковки ориентацией и заполняя тем самым в большей степени поровое пространство песка. В итоге, в зоне впадины волны формируются плотные отложения песка.

В зоне интенсивного перемешивания в гребне волны зерна песка движутся во взвешенном состоянии и быстро, в массовом количестве без какой-либо систематической ориентации, без упаковки выпадают в осадок за прыжком, где перемешивание ослабевает и продольная скорость мала. Условия осаждения песка в этой зоне подобны условиям осаждения при подводном намыве. При беспорядочном массовом выпадении песка в этой зоне формируются рыхлые отложения с относительной плотностью 0,19.

Поток гидросмеси блуждает по пляжу, меандрирует, откладывая на одной вертикали рыхлые и плотные прослойки. Отобранные образцы грунта показывают плотность, осредненную по объему пробы.

Плотность песка при надводном способе намыва в значительной степени зависит от концентрации гидросмеси: с увеличением концентрации (и уклона) она уменьшается. Наибольшую плотность имеет песок, намытый при малой концентрации: в отдельных пробах плотность песка достигала значения 0,66. Наши экспериментальные данные и анализ литературных материалов (З. И. Константина, Вихарев и др.) позволяют считать, что при намыве песка надводным способом в русловых потоках гидросмеси естественным путем может быть достигнута наибольшая относительная плотность — 0,66.

Таким образом, относительная плотность намывного песка изменяется в пределах 0,19—0,66 в зависимости от технологических условий намыва.

Для вывода основного уравнения объемного веса намывного песка при надводном способе намыва в зависимости от концентрации и удельных расходов гидросмеси рассматривается отсек намывного песка длиной, равной длине волны, шириной и высотой, равной единице длины. В этом отсеке на длине повышенной кинетичности a_n формируются отложения песка с малым объемным весом γ_n и относительной плотностью 0,19. На остальной части длины волны $(2l - a_n)$ формируются плотные отложения песка с большим объемным весом γ_n и относительной плотностью 0,66.

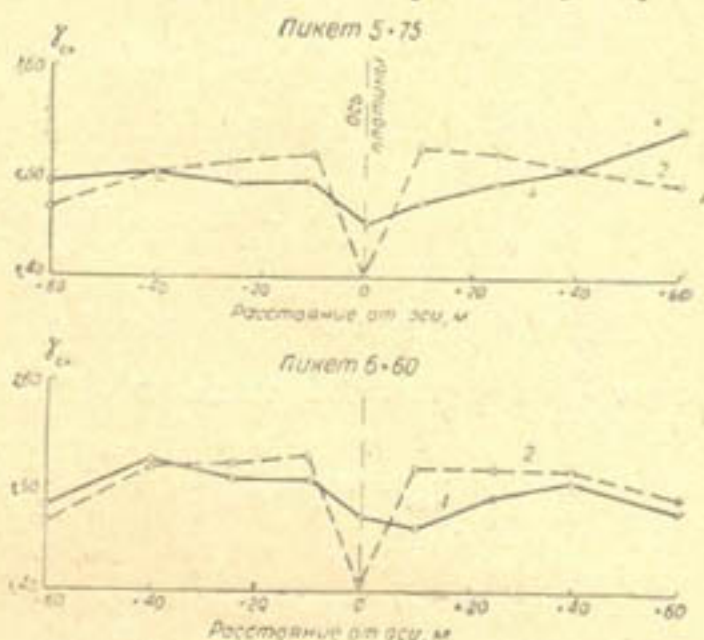


Рис. 3. Графики объемного веса скелета песков Кайрак-Кумской намывной плотины по поперечникам:

1 — по измерению объемного веса скелета $\gamma_{ск}$ в натуре; 2 — по расчету.

Рассчитаем осредненный объемный вес скелета $\gamma_{ск}$:
 вес песка в зоне рыхлого сложения — $a_n \gamma_n \cdot 1 \cdot 1$;
 вес его в зоне плотного сложения — $(2l - a_n) \gamma_n \cdot 1 \cdot 1$;
 суммарный вес в отсеке — $2l \gamma_{ск} \cdot 1 \cdot 1$.

Имеем очевидное равенство

$$2l \gamma_{ск} \cdot 1 \cdot 1 = a_n \gamma_n \cdot 1 \cdot 1 + (2l - a_n) \gamma_n \cdot 1 \cdot 1,$$

из которого после преобразования получаем

$$\gamma_{ск} = \gamma_n - \frac{a_n}{2l} (\gamma_n - \gamma_n). \quad (26)$$

Выражение для относительной длины зоны повышенной турбулентности $\frac{a_n}{2l}$ подставляем сюда из (24):

$$\gamma_{ск} = \gamma_n - c_4 \sqrt{\frac{\frac{\partial w p}{\partial x} \frac{1}{g^3} \frac{1}{q^3} (1+p)}{1}} (\gamma_n - \gamma_n); \quad (27)$$

$$c_4 = 11,2.$$

Формулы показывают, что при увеличении концентрации гидро-смеси плотность отложений песка уменьшается и асимптотически приближается к плотности подводного намыва. Увеличение удельного расхода несколько увеличивает плотность намывного песка.

Уравнение для объемного веса скелета при двустороннем способе намыва получено из (26) с учетом (14) и (25) в следующем виде:

$$\gamma_{ск} = \gamma_n - 11,2 \sqrt{\frac{(\gamma_r - \gamma_{ж}) w_{ср} p_0 \left[1 - (1 - \beta) \frac{x}{L} \right]}{\gamma_r g^3 q^3 \left\{ 1 + p_0 \left[1 - (1 - \beta) \frac{x}{L} \right] \right\}}} (\gamma_n - \gamma_n), \quad (28)$$

где $w_{ср}$ — средняя крупность взвешенного грунта, которая вычисляется после расчета фракционирования по нашему методу [3].

Это уравнение позволяет рассчитать объемный вес песка в намывной плотине на любом расстоянии от выпуска вплоть до уреза прудка. Анализ уравнения показывает, что возле выпуска песок откладывается с меньшей плотностью, а с удалением от выпуска плотность намывного песка возрастает.

В центральной зоне плотины при наличии прудка происходит подводный намыв с рыхлой укладкой. При отсутствии прудка в центральной зоне плотины образуются плотные отложения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кайрак-Кумская правобережная плотина намывалась из мелкозернистого однородного песка неокатанной формы. Гидравлическая крупность песка $w_{ср} = 0,027$ м/сек. Плотина намывалась по двусторонней схеме. Способ намыва безэстакадный с подачей гидросмеси землесосом 8НЗ в количестве 0,25 м³/сек с начальной концентрацией

гидросмеси (в среднем) 20% по весу, т. е. $p=0,20$. Отмыв грунта за профиль составлял 20%, т. е. $\beta=0,2$. Длина полупрофиля плотины составляла $L=60$ м. В процессе намыва на закрепленных поперечниках отбирались пробы для определения объемного веса намывного грунта. На рис. 3 помещены медианные значения объемного веса скелета по всей высоте плотины. При намыве ежедневно измерялся объем размытого грунта и рассчитывалась концентрация гидросмеси.

Каховская плотина намывалась из мелкозернистого однородного песка окатанной формы с гидравлической крупностью $w=0,021$ м/сек. На исследуемом участке грунт размывался на резерве гидромониторами. Плотина намывалась по двусторонней схеме безэстакадным способом при расходе гидросмеси $Q=0,71$ м³/сек и ее начальной концентрации 40% по весу, т. е. $p=0,40$. Отмыв грунта за профиль 10%, т. е. $\beta=0,1$. Длина полупрофиля плотины составляла $L=120$ см. При намыве отбирались пробы на поперечниках на пикетах 1+50 и 2+50 для определения объемного веса скелета грунта.

Результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными.

ВЫВОДЫ

1. На основе исследований структуры волновых наносонесущих потоков получено решение задачи о формировании плотных отложений песка, из которого следует:

а) при подводном способе намыва образуются рыхлые отложения песка;

б) при надводном способе намыва с увеличением концентрации гидросмеси плотность песка уменьшается.

Увеличение удельных расходов гидросмеси увеличивает плотность песка, поэтому торцовый намыв более благоприятен. С удалением от трубопровода по потоку относительная плотность песка возрастает. Лишь в прудке образуются рыхлые отложения.

2. По разработанному методу рассчитывается объемный вес скелета песка при надводном способе намыва в зависимости от концентрации гидросмеси, ее удельного расхода на любом расстоянии от выпуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахметов Б. А. Гидравлика открытых русел, Л., 1941.
2. Преображенский Н. А. Пульсации давлений на дне потока при сопряжении бьефов и расчет толщины крепления в нижнем бьефе, „Известия ВНИИГа“, 1951, т. 46.
3. Шнеер И. А. Автореферат кандидатской диссертации, Ташкент, АН УзССР, 1958.
4. Шнеер И. А. „Гидротехническое строительство“, 1958, № 5.

А. П. ЛЮБОМУДРОВ

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ СУДОХОДСТВА НА АРАЛЬСКОМ МОРЕ

Бурное развитие народного хозяйства в бассейне Аму-Дарьи значительно увеличит его экономические связи с другими районами Союза ССР. Существующие связи нельзя считать удобными и экономически выгодными. Так, перевозки грузов между станцией Каган, Европейской частью Союза ССР и Уралом происходят или по железной дороге длинным путем через Самарканд—Урсатьевская—Арысь—Аральское море—Кандагач, или более коротким, но менее удобным путем через Чарджоу—Ургенч—Ходжейли по железной дороге, от Ходжейли через Муйнак и по морю до ст. Аральское море и далее по железной дороге на Кандагач.

Перевозка грузов между бассейном Аму-Дарьи, севером и северо-востоком (Казахстан, Сибирь, Алтай, Красноярский край) производится по существующим железным дорогам через Урсатьевскую—Арысь—Чу—Алма-Ата—Барнаул и по линии Чу—Моинты. Оба эти направления достаточно уже загружены, а стоимость перевозок высокая.

Особенно неудобны и дороги экономические межрайонные связи низовьев Аму-Дарьи по железным дорогам.

XIX съезд КПСС наметил строительство железной дороги Кунград—Макат через Устюрт. Такая линия значительно улучшит экономические связи бассейна Аму-Дарьи с Европейской частью Союза ССР и Уралом.

Улучшение связей с севером и северо-востоком страны возможно в двух вариантах. Первый — строительство железной дороги Каган—Кызыл-Орда—Теректы и спрямляющего участка Караганда—Экибастуз. Дорога создаст новый выход из Средней Азии на северо-восток. Расчеты показывают высокую эффективность нового направления. Вторым будет вариант с использованием смешанных железнодорожно-водных перевозок по Аму-Дарье и Аральскому морю. Для осуществления таких перевозок понадобится строительство железной дороги Аральское море—Джезказган и спрямляющего участка Караганда—Экибастуз. Задача настоящей работы — изучить условия осуществления второго варианта при использовании Аральского моря для смешанных перевозок.

РЕЖИМ р. АМУ-ДАРЬИ

По данным Б. Д. Зайкова [1], средний годовой сток воды из реки в Аральское море составляет $40,9 \text{ км}^3$.

В настоящее время начинается крупный забор воды из реки в каналы, введена в эксплуатацию первая очередь Каракумского канала в Туркменской ССР, закончено сооружение второй его очереди до Теджена, решен вопрос о строительстве третьей очереди до Ашхабада. Намечено¹ использование 500 тыс. га целинных земель в Каршинской степи, для чего необходима постройка большого Аму-Бухарского канала. Начинается строительство Нурекской плотины ГЭС на Вахше с большим забором воды из Аму-Дарьи².

Для расширения поливных площадей в низовьях Аму-Дарьи и улучшения водопользования необходимо строительство Тахиа-Ташской плотины.

Без большой ошибки можно предполагать, что в течение следующих двух-трех десятилетий сток воды из Аму-Дарьи в Аральское море уменьшится до минимума, необходимого для поддержания судоходства и рыбного хозяйства в нижнем течении реки.

После постройки плотин на реке резко активизируется процесс руслообразования в нижнем течении [5], что значительно усложнит судоходство на этом участке.

РЕЖИМ р. СЫР-ДАРЬИ

Годовой сток Сыр-Дарьи в Аральское море составляет [1] в среднем около 15 км³. Для осуществления плана полного использования воды Сыр-Дарьи для орошения и обводнения намечена постройка целого ряда плотин для годового и многолетнего регулирования расхода и забора воды в оросительные каналы.

По данным С. Т. Алтунина, при максимальном использовании воды на орошение к 1970 г. ниже Кзыл-Ординской плотины расход воды в Сыр-Дарье составит летом около 200, а зимой около 25 м³/сек. В среднем за год это будет около 125 м³/сек, или почти 4 м³/год.

Следует подчеркнуть, что резкое снижение стока воды Сыр-Дарьи в Аральское море уже началось в результате постройки Фархадской и Кайрак-Кумской плотин и будет очень быстро прогрессировать в связи с предстоящим строительством Чардаринской и Нарынской плотин и освоением целинных земель Голодной степи.

МОРФОЛОГИЯ И РЕЖИМ АРАЛЬСКОГО МОРЯ

Площадь зеркала моря на уровне нуля рейки Аральского гидрометеорологического бюро [1] составляет 63915 км², а в 1935 г. при повышенном горизонте воды она доходила до 69670 км². Средняя глубина моря составляет 15, а наибольшая—68 м.

Малые глубины сосредоточены в северной и восточной частях моря, большие—у западных берегов.

Остров Куг-Арал, расположенный примерно по параллели, отделяет от моря северную часть—Малое море. Против этого острова в море впадает Сыр-Дарья. Бар при впадении имеет относительно небольшие размеры, но довольно интенсивно развивается. Меняется и русло реки в самих низовьях. С юга в море впадает Аму-Дарья. На всем протяжении в низовьях от Питняка река проходит в намытом отложениями русле несколькими протоками. Впадая в море, она приобретает интенсивно развивающийся бар.

¹ „Правда Востока“, 1960, 25 марта.

² „Правда Востока“, 1960, 8 марта.

При существующем годовом стоке в Аральское море рек Аму-Дарьи $40,9 \text{ км}^3$ и Сыр-Дарьи 15 км^3 , или общем стоке $55,9 \text{ км}^3$ море получает столб воды около $0,87 \text{ м}$ при площади зеркала моря, соответствующей нулю рейки Аральской станции.

По данным С. Т. Алтунина, в районе моря выпадает 0,082 м осадков в год. Таким образом, море получает в год от речного стока и атмосферных осадков столб воды 0,952 м. Средняя высота столба воды, испаряющейся с поверхности моря, как указывает С. Т. Алтунин, составляет 0,913 м/год.

Приведенные цифры годового притока воды в море и испарения с поверхности его достаточно хорошо балансируются и характеризуют период некоторого повышения уровня воды моря при стабильном стоке.

При начавшемся крупном заборе воды из Сыр-Дарьи и Аму-Дарьи сток в море резко сократится, а уровень его снизится.

Сокращение речного стока в пределах ближайших 20—30 лет можно предполагать в следующих размерах:

Изъятие воды			
<i>из реки</i>	<i>в канал</i>	<i>в году</i>	<i>км³</i>
Сыр-Дарья	разные	1970	10,6
Аму-Дарья	Каракумский первой очереди	1960	2,5
	" второй "	1965	3,0
	Аму-Бухарский первой "	1970	3,0
	" второй "	(ориентировочно) 1975	4,0

	Расход воды	
на нужды орошения в низовьях Аму-Дарьи	1975	11,0

Таким образом, к 1975—1980 гг. изъятие из годового стока Амударьи 25 км³ воды следует считать весьма реальной возможностью. В результате сток в Аральское море из обеих рек может снизиться до 10 км³/год.

При стоке в море в среднем $33 \text{ км}^3/\text{год}$ [1] уровень его понизится приблизительно на 13 м за 20—25 лет с начала значительного изъятия воды.

При стоке 15 км³/год уровень его снизится более чем на 20 м.

Как видно из рис. 1, понижение уровня моря на 13 м (что может стать реальным к 1980—1985 гг.) вызовет почти полное осушение северной части с заливами Перовского, Паскевича и Сарычеганак. Будет осушена полоса до 40 км шириной вдоль восточного побережья моря. Море уйдет от южного берега, и современный остров Муйнак сначала превратится в полуостров, а затем и вообще перестанет быть приморским пунктом.

Понижение уровня моря на 20 м и более повлечет за собой осушение почти всего моря. Вода останется в относительно узкой впадине, расположенной у западных берегов моря. Впадина протянется на северо-восток к острову Куг-Арал узкой полосой.

ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ АРАЛЬСКОГО РАЙОНА
КЗЫЛ-ОДИНСКОЙ ОБЛАСТИ И НИЗОВЬЕВ АМУ-ДАРЬИ

Аральский район Кызыл-Ординской области имеет широкие перспективы экономического развития.

К северо-западу от моря, в районе ст. Чокусу, находятся богатые залежи оолитового железняка. Месторождение это впервые упоминается Бергом при описании берегов Аральского моря.

В озерах Аральского района содержится громадное количество необходимых для народного хозяйства минеральных солей.

На севере моря, а также на восточном его берегу установлены нефтеносные участки.

На п-ове Куланды давно вскрыты месторождения угля, сырья для цементной и химической промышленности.

Северная часть моря вместе с низовьями Сыр-Дарьи представляет собой район богатого рыбного хозяйства, причем как раз в этой части наблюдается миграция рыбы для нереста в реку и молоди в море для отгула, в то время как вдоль восточного побережья моря миграция рыбы ограничивается местными существующими у побережья архипелагами.

Развитие хозяйства Аральского района Кызыл-Ординской области в значительной степени ограничивается отсутствием пресной воды. Опыт показывает, что на супесях Приаралья, даже самых тощих, с успехом можно выращивать самые разнообразные культуры при относительно небольшом количестве воды для полива.

К южной и юго-восточной частям Аральского моря примыкает громадная культурная зона дельты Аму-Дарьи. Перспективы хозяйственного развития этого района громадны. В недалеком будущем хозяйственное значение низовьев Аму-Дарьи резко поднимется. Низовья этой реки и весь Аральский район являются крупными поставщиками рыбы и рыбных консервов. Здесь процветает ондатровый промысел.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ СВЯЗИ ПРИАРАЛЬСКОГО РАЙОНА

По данным Среднеазиатского госпароходства, в 1960 г. намечен вывоз через Аральск 170 тыс. *т* грузов. Основная часть прибывающих в порт по воде грузов направлялась дальше по железной дороге. Хлопок из Аральска отправляется по Оренбургской дороге на северо-запад, рыба — в оба направления.

Кроме того, через Аральск по морю и далее по реке намечено отправлять в 1960 г. 259 тыс. *т* грузов, основные из которых прибывают с железных дорог Урала, Поволжья, Украины и частично Сибири. Низовья Аму-Дарьи получают значительное количество хлеба и леса из Сибири окружным путем по железной дороге через Арысь и Чарджоу.

Начавшееся в бассейне Аму-Дарьи крупное гидротехническое строительство вызовет мощный рост народного хозяйства в бассейне реки и смежных с ней районах за счет роста как хлопководства, так и всех других отраслей.

Произведенный анализ характера и размеров экономических связей бассейна Аму-Дарьи позволил выявить их некоторые особенности.

Размеры экономических связей среднеазиатских республик гораздо шире в настоящее время с северо-востоком страны (Сибирь, Северный и Восточный Казахстан, Красноярский край), чем с северо-западом (Урал, Европейская часть СССР). В результате роста индустриализации народного хозяйства республик Средней Азии зна-

чительно увеличился вывоз промышленной продукции за их пределы и в первую очередь в районы крупного строительства, т. е. на северо-восток. И, кроме того, интенсивное развитие хозяйства этих республик обусловило резкий рост завоза сюда леса и хлеба из Сибири — опять с северо-востока нашей страны. Размеры этих перевозок, определенные с учетом развития народного хозяйства в бассейне Аму-Дарьи, показывают, что самостоятельный выход на северо-восток жизненно необходим. Особенно большое значение он имеет для низовьев Аму-Дарьи, так как окружной путь на северо-восток через Чарджоу—Ташкент—Арысь значительно удлиняет и удорожает перевозки.

Расчеты показали, что постройка железной дороги Каган—Кзыл-Орда—Теректы и спрямляющей линии Караганда—Экибастуз создает новый транспортный выход из бассейна Аму-Дарьи на северо-восток. Особо благоприятные условия рельефа этой линии обуславливают целесообразность переключения на нее с Туркестано-Сибирской дороги крупных перевозок не только для бассейна Аму-Дарьи, но и для района Ташкента и Ферганы.

Вторым вариантом осуществления нового крупного выхода из бассейна Аму-Дарьи на северо-восток нужно считать выход через Аральское море. Железнодорожным продолжением его может быть предложена линия Аральское море—Джезказган. Для осуществления этого варианта необходимо сохранить судоходство по Аральскому морю и при понижении его уровня.

При осуществлении межрайонных связей по второму варианту размеры перевозок по Аральскому морю будут значительно выше запланированных Госпароходством.

Большие по сравнению с существующими и планируемыми перевозки по морю и крайне неустойчивый режим нижнего течения Аму-Дарьи потребуют устройства морского порта в юго-западном углу моря и соединения его с железной дорогой Кунград—Макат особым ответвлением. Идея такой организации перевозок была предложена в 1930 г. экспедицией МПС под руководством А. В. Горинова при изысканиях железной дороги Чарджоу—Кунград. Предполагалось построить морской порт у мыса Урга.

СТАБИЛИЗАЦИЯ СУДОХОДСТВА НА АРАЛЬСКОМ МОРЕ

Для сохранения возможности судоходства по Аральскому морю при значительном положении его уровня автором было сделано в 1952 г. предложение отделить дамбами северную часть моря от южной по проливам между островом Куг-Арал и материком. Сток Сыр-Дарьи необходимо при этом переключить в Малое море отводом ее русла в низовьях. Малое море может быть опреснено, что, помимо сохранения возможности судоходства при общем понижении уровня моря, создаст в пустынном Аральском районе Кзыл-Ординской области крупный пресноводный бассейн. Это будет значительно способствовать развитию производительных сил района и Кзыл-Ординской области.

Объем Малого моря, ограниченного с юга островом Куг-Арал и указанными на чертеже дамбами, составляет около 50,8 км³. Вычислен он по изобатам на основании промеров 1954 г.

При площади зеркала Малого моря, среднем многолетнем уровне 4550,2 км² и среднем столбе испаряющейся воды 0,913 м [5] объем

испаряющейся с поверхности Малого моря воды составит в среднем $4,15 \text{ км}^3/\text{год}$. Сопоставляя эти цифры с данными годового стока Сыр-Дарьи, можем сделать некоторые выводы.

Во-первых, в результате отделения Малого моря и переключения стока Сыр-Дарьи в Малое море оно в течение нескольких лет опреснится. Опреснение будет больше в восточной части и у поверхности. Для возможно более быстрого опреснения Малого моря необходимо использовать ближайшие пять лет, в которые Сыр-Дарья еще будет сбрасывать в море значительное количество воды.

Во-вторых, минимальный сброс воды в море будет достаточен для компенсации испарения воды с зеркала Малого моря.

В-третьих, приходится констатировать, что начавшийся интенсивный забор воды Сыр-Дарьи на пополнение водохранилищ и в каналы уже отражается на состоянии озер в нижнем течении реки.

В-четвертых, такой забор воды из Сыр-Дарьи и недостаток ее для низовьев и моря, заставляет ставить вопрос о максимальной экономии воды реки.

Таковы возможные перспективы отделения Малого моря дамбами.

Практически после 1970 г. сток из Малого моря в Большое прекратится. Уровень Большого моря снизится, и для обеспечения судоходства необходимо будет построить шлюз. Наиболее подходящим местом для устройства шлюза можно считать восточный мыс острова Куг-Арал, или узкую перемычку посередине острова Куг-Арал.

В обоих случаях к шлюзу придется провести подводный канал-подход со стороны Малого моря и открытый канал для вывода судов в южную часть. Через проливы должны быть построены дамбы. Для более успешного опреснения Малого моря сброс излишка воды в случае поступления его из Сыр-Дарьи может быть осуществлен в западной дамбе. Восточный пролив по вариантам возможного направления дамбы имеет ширину 10—15 км и наибольшую глубину порядка 14 м. Впадение Сыр-Дарьи в Малое море произойдет непосредственно за дамбой, наносы реки будут откладываться у дамбы.

Для отвода русла Сыр-Дарьи в Малое море при первом варианте потребуется постройка плотины длиной 15 км, нового почти пятикилометрового русла и перемычки на реке протяжением от плотины около 10 км.

По второму варианту предусматривается строительство дамбы длиной почти 10 км и перекрытие всех протоков в низовьях реки, кроме северного, который будет впадать в Малое море у самой дамбы.

Следовательно, комплекс необходимых устройств по отделению северной части моря от южной, поддержание существующего уровня моря и опреснение северной части не отличаются грандиозными размерами. Вопрос стабилизации судоходства в южной части моря пока неясен.

По данным С. Т. Алтунина, задержание речных наносов у плотин на Аму-Дарье и осветление воды нижних бьефов повлечет за собой интенсивный процесс руслообразования.

Понижение уровня моря на 13—15 м и постоянная в первый период после постройки гидроузла Тахиа-Таша отметка нижнего бьефа создаст средний уклон реки от плотины до изобаты 15 около 0,0001, больший существующего на реке. Он велик для крупной реки. Это обстоятельство также вызовет интенсивное руслообразование.

Высказанные соображения заставляют отказаться от крупного судоходства в нижнем течении реки на длительный период стабилизации русла.

Более надежен вариант устройства морского порта у мыса Улькентумсук и подведения к этой точке ответвления от железной дороги Кунград—Макат. К мысу Улькентумсук близко подходят большие глубины, и значительных работ при понижении уровня моря не потребуется.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СООРУЖЕНИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТЬ СУДОХОДСТВА ПО АРАЛЬСКОМУ МОРЮ, И ОЧЕРЕДНОСТЬ ПОСТРОЙКИ ИХ

Для обеспечения возможности судоходства по морю после значительного понижения уровня его потребуются следующие главные сооружения.

Дамбы через проливы

Длина восточной дамбы — 10 км, средняя высота—8 м при наибольшей глубине пролива 14 м. Дамба должна быть приспособленной для пропуска автомобильной дороги. Она будет сооружаться при одинаковом уровне воды в обоих бьефах. В связи с этим с обеих сторон дамба должна иметь укрепления и парапеты для защиты откосов и проезжей части от волны.

При ширине дамбы по верху около 20 м, объем ее будет около 6 млн. м³.

Длина западной дамбы, по которой также пройдет автомобильная дорога, около 1 км, средняя глубина—1 м при наибольшей глубине около 1,5 м. Она должна иметь водосливную часть длиной порядка 200 м. Остальная часть может быть такого же типа, как и восточная. Объем земляной части дамбы около 20 тыс. м³. Водосливная часть ее потребует около 50 тыс. м³ бетонной кладки.

В восточной части острова Куг-Арал должны быть построены два шлюза для пропуска судов с баржами. При годовом грузообороте в смешанном сообщении около 3 млн. т число шлюзований будет около 30 в сутки.

К шлюзам должны подводиться каналы. Канал со стороны Малого моря—морской. Протяжение его не превысит 2 км (до глубины 5 м) при ширине по дну 60 м, объем—около 250 тыс. м³ подводной выемки грунта.

Канал с южной стороны общей длиной около 15 км будет строиться постепенно, по мере понижения уровня южной части моря. После понижения уровня на 13—16 м он частично окажется на сухом месте, частично под водой. Общий объем канала около 2 млн. м³.

Дамба объемом около 270 тыс. м³, перекрывающая протоки Сыр-Дарьи, впадающие в Большое море, будет иметь протяженность около 15 км, из них около 1 км станет перекрытием южного протока реки.

Сыр-Дарья впадает в Малое море непосредственно у самой дамбы, наносы реки отложатся непосредственно у дамбы.

Как было сказано выше, у мыса Улькентумсук должен быть построен порт для перевалки грузов на железную дорогу. Порт будет иметь на период понижения уровня моря меняющуюся отметку причальной линии.

Подъездной путь нормальной колеи от железной дороги Кунград — Макат пройдет от одной из ее станций. Длина подъездного пути около 50 км.

Порт Аральск должен быть значительно расширен.

Очередность постройки сооружений

В первую очередь, в ближайшие пять лет необходимо построить дамбы через проливы, отделяющие остров Куг-Арал от материка, и дамбы, направляющие воду Сыр-Дарьи в Малое море.

Пока сброс воды Сыр-Дарьи в море достигает $15 \text{ км}^3/\text{год}$, Малое море может быть в короткий срок (4—5 лет) опреснено настолько, чтобы можно было пользоваться водой из моря для питья и полива растений.

Также в ближайшее время должны быть построены: один шлюз и морской канал к нему со стороны Малого моря для сохранения существующего судоходства.

Во вторую очередь по мере понижения уровня большей части моря и роста перевозок должны быть построены остальные сооружения.

Масштабы работ, особенно первой очереди, не отличаются грандиозностью.

Необходимость ускорения строительства сооружений первой очереди очевидна, поскольку сток воды Сыр-Дарьи в море начинает резко уменьшаться.

ОПРЕСНЕНИЕ МАЛОГО МОРЯ

Наблюдения за соленостью воды в Аральском море показывают, что на поверхности вода менее соленая, чем на глубине.

Несомненно, что такое же явление, но с более резкой разницей будет наблюдаться и в Малом море после отделения дамбами и сброса в него воды Сыр-Дарьи.

В связи с тем, что гребень водосливной плотины в западной дамбе вряд ли целесообразно закладывать на глубине, большей 5 м от горизонта воды, можно думать, что опреснение распространится до глубины не более 10 м. Объем воды до этого уровня составляет около 35 км^3 . Предполагая, что именно в этой зоне и начнется в первую очередь опреснение, можем думать, что уже через пять лет при стоке в Малое море $15 \text{ км}^3/\text{год}$ соленость воды исчезнет. При уменьшении стока из Сыр-Дарьи до $4 \text{ км}^3/\text{год}$ сброс воды из Малого моря прекратится, и начнется медленный процесс засоления моря.

Опреснение Малого моря даст большой толчок развитию всех отраслей народного хозяйства Аральского района. Станет возможной добыча железных руд, которые выходят на поверхность земли на побережье залива Перовского, добыча угля и других полезных ископаемых на п-ове Куланды.

Интенсивно разовьется животноводство и, хотя не в больших масштабах, земледелие.

ВЫВОД ВОДЫ СИБИРСКИХ РЕК В ТУРАНСКУЮ НИЗМЕННОСТЬ

В статье М. М. Давыдова [4] показана реальная возможность пропуска больших масс воды (от 1000 до $10\,000 \text{ м}^3/\text{сек}$) из сибирских рек Енисея и Оби через Тургайский перевал в Аральское море и прилегающий к нему район с последующим пропуском этой воды

через Аральское море в Узбой. Указанный расход соответствует годовому стоку от 32 до 320 км³/год. По расчетам М. М. Давыдова, воды сибирских рек должны пополнить убыль воды в Аральском море в связи с большим забором ее из рек Аму-Дарья и Сыр-Дарья, оросить около 25 млн. га и обводнить около 20 млн. га земли Туранской низменности.

Осуществление пропуска воды сибирских рек в Туранскую низменность связано с громадными работами по постройке плотин на Енисее и Оби, с затоплением громаднейшей территории Сибирской низменности при постройке плотин у Белогорья и с громадными земляными и гидротехническими работами на Тургайской возвышенности.

Кроме того, водный баланс среднеазиатских республик при намеченном плане освоения новых земель покрывается полностью за счет воды своих рек на несколько десятилетий.

Таким образом, вывод воды сибирских рек в Среднюю Азию окажется необходимым нескоро. Однако, поскольку этот вопрос представляется вполне возможным, его следует учитывать и в других современных проектировках, в частности при решении вопросов, затронутых в настоящей работе.

Прежде всего, необходимо внести некоторые коррективы в предложения М. М. Давыдова.

Понижение уровня Аральского моря благоприятно отразится на развитии хозяйства на южном и юго-восточном побережьях моря. Во-первых, в дельте Аму-Дарья обсохнут громадные территории болот и озер, что даст новые земли для возделывания сельскохозяйственных культур и скотоводства. Во-вторых, в дельте Аму-Дарья понизится уровень грунтовых вод, что облегчит борьбу с засолением почвы.

Таким образом, стремиться сохранить современный уровень Большого Аральского моря нет надобности. Правда, с понижением уровня Аральского моря и осушением болот и озер в существующей дельте Аму-Дарья пострадает ондатровый промысел, однако он вряд ли является решающим в развитии народного хозяйства этого района.

Представляется целесообразным поддерживать снизившийся уровень Аральского моря на определенной отметке, например на 10—15 м ниже существующего уровня. По исследованиям Б. Д. Зайкова, для поддержания такого уровня потребуется сбрасывать в море около 33 км³ воды ежегодно.

Обязательный минимум сброса воды в море для поддержания рыбного хозяйства и судоходства в низовьях рек составляет по Сыр-Дарье 4 км³/год. Недостающие до тридцати трех 29 км³ целесообразно взять из сибирской воды и пропустить ее из канала в северную часть залива Сарычеганак или Перовского с устройством гидроэлектростанций на обоих перепадах: из канала в Малое море и из Малого моря в южную часть.

Малое море, получив пресную воду, сделается проточным и совершенно опреснится.

По расчетам М. М. Давыдова, вода сибирских рек от Тургайского перепада может быть проведена по каналу северней Аральского моря и подведена к Сыр-Дарье ниже Кзыл-Орды.

От Кзыл-Ординской плотины на Сыр-Дарье осуществляется сброс воды в древнее русло Джана-Дарью. Экспедициями Академии наук СССР и КазССР установлено вдоль русла Джана-Дарьи наличие

500 тыс. га земель, пригодных для возделывания и носящих следы древнего орошения. В настоящее время на эти земли предположено давать по Джана-Дарье небольшое количество воды только для нужд животноводства.

Решая вопрос о подводе сибирских вод, следует учесть необходимость возобновления орошения земель по Джана-Дарье, в связи с чем выводы М. М. Давыдова нужно пересмотреть.

Целесообразно проложить канал на восток так, чтобы он мог питать верхний бьеф Кызыл-Ординской плотины. Тогда подача воды для орошения земель вдоль русла Джана-Дарьи будет обеспечена.

При дальнейшем расширении Сибирско-Туранского канала сибирская вода может быть проведена от Тургайского перепада по западному берегу Аральского моря к выходу Узоя из Сары-Камышской впадины ее заполнения.

Таким образом, может быть орошена и обводнена вся равнина Устюрта и обеспечено необходимое количество воды для Прикаспийской нефтяной и субтропической зон в долине Атрека и Сумбара (Мессернянское плато).

ВЫВОДЫ

1. Большой забор воды из Аму-Дарьи и Сыр-Дарьи и неизбежное понижение уровня Аральского моря приведут к прекращению судоходства по морю и ликвидации рыбного промысла в северной части моря.

2. Судоходство по Аральскому морю может быть использовано для крупных межрайонных связей бассейна Аму-Дарьи с Сибирью, Алтаем, Красноярским краем.

3. Сохранение судоходства по Аральскому морю возможно путем отделения дамбами Малого моря и сохранения уровня отделенной северной части моря за счет стока из Сыр-Дарьи.

4. Отделение северной части моря позволит сохранять и развивать рыбное хозяйство.

5. В Аральском районе Кызыл-Ординской области образуется крупный пресноводный бассейн, который обеспечит развитие многих отраслей промышленности в районе.

6. Комплекс сооружений, необходимых для сохранения судоходства по морю, по объему невелик, и осуществление его не встретит больших препятствий.

7. Намеченный вариант должен быть рассмотрен при решении вопроса выходов из бассейна Аму-Дарьи в северо-восточные районы Союза ССР.

Уже сейчас воду обеих рек—Аму-Дарьи и Сыр-Дарьи—нужно всемерно экономить, не допуская строительства водохранилищ с широкими разливами, малыми глубинами и с затоплением хорошо фильтрующих поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайков Б. Д. Современный и будущий водный баланс Аральского моря, Труды НИУ ГМС, сер. IV, вып. 39, М., 1946.
2. Геллерт и Сорокина. К вопросу о последствиях предстоящего понижения уровня Аральского моря, Изв. АН СССР, сер. геогр. наук, 1, 1951.
3. Фортунатов М. А. и Сергеев В. Д. Новые данные о морфологии Аральского моря, Известия Всесоюзного географического общества, 1, 1950.
4. Давыдов М. М. Обь—Арал—Каспийское водное соединение, Гидротехническое строительство, № 3, 1949.
6. Гидрометеорология в помощь народному хозяйству. Материалы конференции 24—27 марта 1953 г., Ташкент, АН УзССР, 1954.

Член-корр. АН УзССР М. С. ВЫЗГО

РАСТЕКАНИЕ И ПУЛЬСАЦИЯ НАКЛОННОЙ СТРУИ В СОЗДАННОЙ ЕЮ ВОРОНКЕ РАЗМЫВА И ЗАВИСИМОСТЬ

$$K = f(\beta^\circ, x, \lambda)$$

В аэро- и гидродинамике почти не рассматривается несвободное растекание струй кругового или прямоугольного сечения. Недостаточно полно изучен вопрос о растекании даже свободной струи, о форме такой струи, о присоединенных через граничную зону массах жидкости, добавочных расходах на некотором начальном участке струи, об эпюрах распределения скоростей и давлений вдоль струи (с ограничением случаями постоянства давления — условие изобарности — в окружающей среде безграничного объема).

В ряде опубликованных работ освещается расчет глубины размыва бурным турбулентным потоком для установления необходимой отметки заложения фундамента сооружения. В них отмечена чрезвычайная сложность взаимодействия конструкций сооружений, потока и русла, явления аэрации, пульсации и бифуркации, смены режимов, влияния взвеси и истирания на конечные размеры размыва и т. д.

Результаты новых исследований все более и более приближают эту проблему к завершению, говорят о возможности надежного использования получаемых данных при проектировании и расчетах инженерных сооружений в различных гидрологических и эксплуатационных условиях.

Нами рассматривается вопрос о расчете вероятной и возможной глубины размыва за гидротехническим сооружением консольного типа (консольный перепад, плотина с укороченным водобоем, плотина с водосбросным носком и др.)¹. Местный размыв русла за сооружением в этих условиях производит ниспадающая наклонная струя.

Явление размыва разбирается в соответствии со схемой рис. 1. При растекании струи в образующейся в процессе размыва вымывной воронке (яме) размыва, в конечной стадии обычно наблюдаются два водоворота — поверхностный и донный. Динамическая ось потока при входе в водяную среду меняет свое направление — угол α° наклона струи до входа в воронку и угол β° при входе струи из воздуха в водяную подушку. В зависимости от скорости потока, высоты падения и толщины струи она в той или иной мере аэрируется, что еще более способствует изменению α° на β° , уменьшает проникновение струи в водяную подушку и глубину размыва. Формы и размеры водоворотов зависят от свойств грунта: в прочных грунтах они меньше, в слабых — больше, так как последние в меньшей степени сопро-

¹ О ремонте плотины с водоотбросным носком на Волховской ГЭС см. в книге Г. М. Гольденберга „Эксплуатация подпорных, водосбросных и водоприемных сооружений гидроэлектростанций“, М.—Л., Энергоиздат, 1949.

тивляются размыву. В условиях широкого сливного фронта, при обеспечении равномерного распределения расхода воды, имеется приближение к условиям плоской (двухмерной) задачи, и тогда можно считать, что верхний водоворот (валец) связан с расходом $q_{\text{верхн}} = xq$, а нижний — с расходом $q_{\text{нижн}} = (1 - x)q$, где $q = \frac{Q}{b}$ — погонный (удельный) расход воды на сливном фронте сооружения (Q — полный расход воды, b — ширина сооружения).

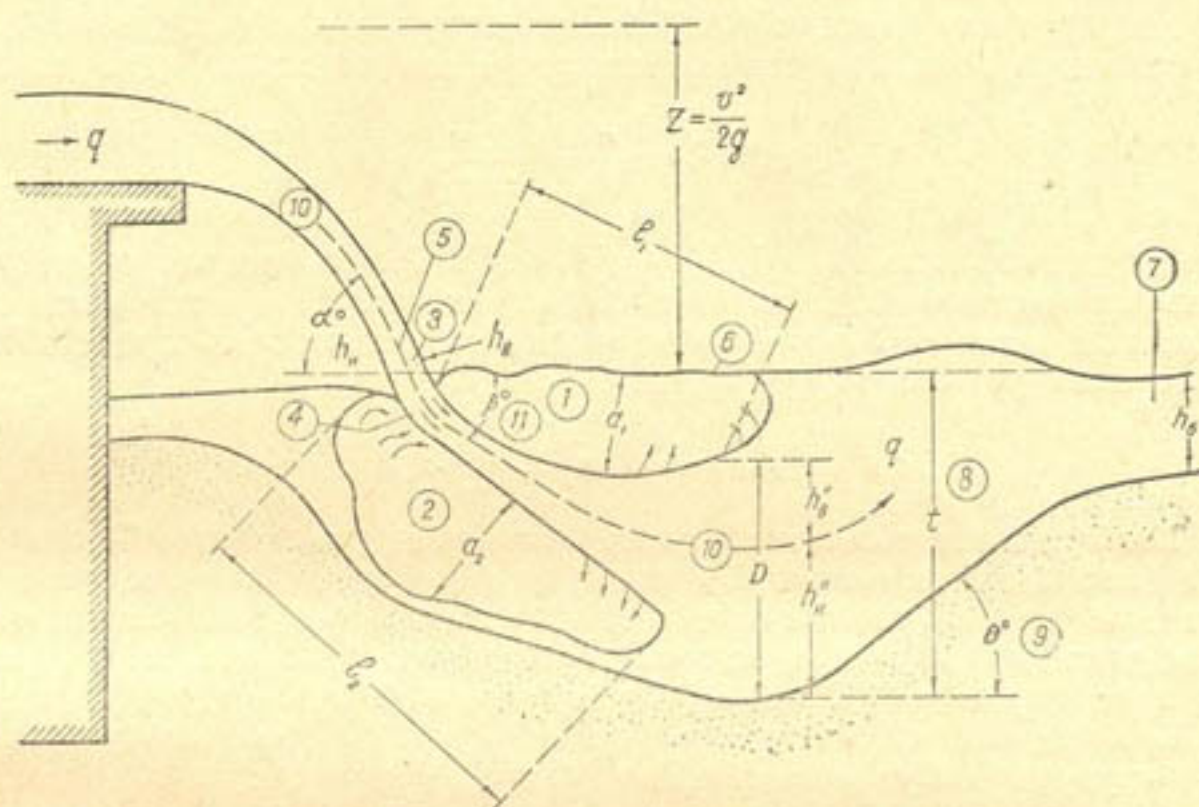


Рис. 1. Схема размыва наклонной струей:

1 — поверхностный валец (водоворот) длиной l_1 , высотой a_1 ; 2 — донный валец (водоворот) длиной l_2 , высотой a_2 ; 3 — xq — доля расхода воды q , создающая поверхностный валец; 4 — $(1 - x)q$ — доля расхода воды q , создающая донный валец; 5 — V — скорость потока в месте падения струи (входа в воронку размыва); 6 — Z — действующий расчетный напор; 7 — h_6 — глубина в отводящем русле; 8 — t — наибольшая глубина размыва; 9 — $\text{ctg } \theta^0 = m$ — заложение откоса, зависящее, как и $\lambda = \frac{l}{a}$, от свойств грунта; 10 — динамическая ось потока; 11 — угол β^0 наклона динамической оси струи после входа в воронку размыва, определяемый по формуле $\text{tg } \beta^0 = \frac{\text{tg } \alpha^0}{\sin \alpha^0 + \cos \alpha^0}$.

Динамическая ось как бы разделяет поток и водовороты на две зоны — верхнюю и нижнюю. Отмечая для каждой зоны некоторое сходство с явлением гидравлического прыжка (представляющим частный случай растекания струи с завершённым устойчивым циклом) и применяя соответствующие уравнения сопряженных глубин, получаем

$$t = a_1 + h_1^* + h_2^* = l \sin \beta^0 + D,$$

где
$$h_1^* = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8q_{\text{верхн}}}{qh_1^3}} - 1 \right] \cong 0,95 \sqrt{xqVZ},$$

$$h_2^* \cong 0,95 \sqrt{(1-x)qVZ}.$$

Учитывая влияние аэрации с помощью коэффициента A , сбойность — коэффициента σ , а влияние угла наклона струи и свойства размываемого грунта — коэффициента K , мы получили расчетную формулу для глубины размыва в виде

$$t = AK \sqrt{\sigma q \sqrt{Z_0}}. \quad (1)$$

Здесь Z_0 — действующий на сооружении напор (высота падения струи с учетом скорости подхода потока).

Коэффициент аэрации A падающей струи тем меньше, чем больше насыщена воздухом струя. Например, для плоской струи толщиной

$$h_1 + h_2 = \delta = \frac{q}{V} = \frac{q}{\varphi \sqrt{2gZ_0}},$$

имеется зависимость $A = (\delta, V) = f(q, Z_0)$. Ранее, исходя из результатов наблюдений на действующих сооружениях, мы приводили ее в табличной форме. Указанная зависимость может быть представлена также и эмпирической формулой

$$A \approx 0,55 + 0,3 \frac{q}{Z_0}. \quad (2)$$

Коэффициент сбойности, рассредоточения или концентрации расхода (массы), учитывающий в какой-то мере и добавочные (присоединенные) массы, упомянутые в начале статьи, без сбойности и гасителей энергии $\sigma \approx 1$, при наличии расщепителей потока и гребенчатых трамплинов $\sigma \ll 1$, при сбойном течении $\sigma \gg 1$.

Коэффициент глубины размыва, зависящий от свойств размываемого грунта и от угла наклона струи (β°), влияющих на размеры водоворотных зон, т. е. на величину $\frac{l}{a} = \lambda$ и на величину t , выразим в виде

$$K = N \sin \beta^\circ + M, \quad (3)$$

где

$$N = 0,95 \lambda \sqrt{x}, \quad (4)$$

$$M = 0,95 (\sqrt{x} + \sqrt{1-x}). \quad (5)$$

Согласно рекомендации Лера¹,

$$\beta^\circ = \arctg \frac{\operatorname{tg} \alpha^\circ}{\sin \alpha^\circ + \cos \alpha^\circ}. \quad (6)$$

Величины x и λ , полученные на основе ряда опытных данных, позволили нам рекомендовать расчетные величины K , широко используемые в практике проектирования. Они проверялись на ряде действующих сооружений, в результате чего было получено достаточно удовлетворительное совпадение расчета с наблюдениями.

Тем не менее сложность и многообразие явлений размыва требуют дальнейшего изучения вопроса, уточнения расчетных формул и коэффициентов для различных гидравлических схем и конструкций сооружений. Например, ранее мы не уделяли достаточного внимания макропульсации потока, пульсации углов α° и β° (рис. 2) и наличию

¹ См. статью Лера „Ein Beitrag zur Berechnung des Kolks“, „Bauingenieur“, 1926, № 6. Ряд полезных сведений и примеров разрушений на плотинах Германии приведен и в статье А. Шефера „Die Energievernichtung an Wehranlagen“, „Die Bautechnik“, 1929, № 18.

смены поверхностного и донного режимов (зависящей в какой-то мере от угла наклона струи), имеющим большое значение.

Наиболее подробные опыты были выполнены Е. Я. Фроликовой [25, 26], некоторый анализ результатов наблюдений которой мы и приведем.

Часть экспериментов была выполнена при неаэрированной струе ($A = 1$), вытекающей из жесткого насадка под уровень воды (начальный угол наклона динамической струи α° равен углу наклона β°). Под струей образовывалось пониженное давление (по условиям опытов в лотке с односторонним оттоком), что увеличивало, как отмечает Е. Я. Фроликова, угол наклона струи (делало ее круче) и усиливало пульсацию. Даже при $\alpha^\circ = 90^\circ$ наблюдалась некоторая пульсирующая асимметрия. На подобное явление обращается внимание и в других работах [8], хотя, казалось бы, должна быть полная симметрия и $x = 0,5$, особенно при двухстороннем и свободном оттоке. При $\alpha^\circ = 0^\circ$ Е. Я. Фроликова отмечает наличие преимущественно одного, донного, водоворота. То же самое наблюдается и при выходе с горизонтального крепления потока с большой скоростью, как это описано Н. Н. Суровой, показавшей влияние на местный размыв (t и β°) изменения отметки горизонта воды нижнего бьефа, наблюдающегося при общем размыве русла (например, за счет аккумуляции речных наносов в водохранилище). Из работы [21] видно, что при горизонтальном креплении и при бурном режиме сопряжения динамическая ось заметно меняет свое направление с изменением отметок поверхности воды в русле, хотя гидравлические расчеты пока еще не позволяют, ввиду малой изученности структуры потока, достаточно точно вычислять углы α° и β° для подобных условий. Некоторая оценка аналогичных условий возможна на основе экспериментальных данных, в частности полученных А. Шокlichem (см. реферат его работы в данном сборнике) и И. Эйнвахтером [30]. Последний при коротком горизонтальном креплении в лотке шириной $b = 25$ см, $q = 0,016$ м³/сек при истечении из-под плоского щита (перед которым был напор 14,5 см, отметка уровня воды в нижнем бьефе на 6,5 см выше отметки дна крепления) получил данные по размыву песчаного русла, приведенные в табл. 1.

В условиях этих опытов (размыв бурным потоком) $A = 1$ и $\sigma \approx 1$. При больших $\lambda_{кр}$ угол $\beta^\circ \rightarrow 0^\circ$ и коэффициент K по формуле (1) становится равным $K = 1,34$, что оправдывается опытами И. Эйнвахтера. При меньших длинах креплений его опыты, как и опыты Н. Н. Суровой, дали $K > 1,34$. Это, несомненно, следствие $\beta^\circ > 0^\circ$ и пульсация потока. Опыты И. Эйнвахтера показали влияние береговых (у стенок лотка) вихрей на глубину размыва. На основе опытов с неразмываемым дном такие вихри описали А. Н. Рахманов и П. К. Цветков. В результате некоторых других опытов И. Эйнвахтером [30]

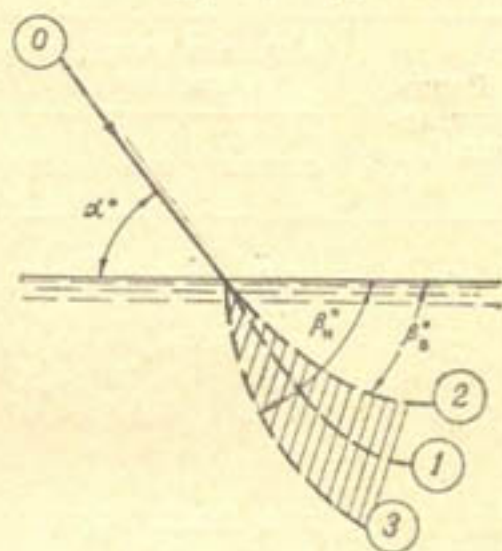


Рис. 2. Схема пульсации угла β° (наклона динамической оси потока). Заштрихована зона пульсации: 0 — ось струи до входа в воронку размыва; 1 — среднее положение динамической оси; 2 — верхнее положение динамической оси; 3 — нижнее положение динамической оси (самое невыгодное, с точки зрения возможного увеличения глубины проникания и глубины размыва).

были выявлены смены режимов (донного на поверхностный и обратно).

Относительный размер водоворотной зоны, т. е. $\lambda = \frac{l}{a}$, далеко не устойчивая и пульсирующая величина. Без специальных исследований нельзя найти точное значение λ , и эта величина, вероятно, различна для одного и того же грунта при различных α° (при малых α° величина λ должна быть больше). Невозможность точного гидравлического, а тем более гидромеханического расчета относительной длины вальца, вынуждает принимать эту величину приближенно. Нами,

Таблица 1

Длина крепле- ния l , см	Глубина размыва ниже дна крепления T , см				Глубина в месте размыва, $t = T + 6,5$	$\lambda_{кр} = \frac{l}{h_c^*}$ при $h_c^* = 6,5$ см	$K = \frac{t}{VqVZ}$
	справа	ось	слева	средняя			
10	6,20	4,25	6,30	5,6	12,1	1,54	1,55
15	5,25	3,95	5,63	4,9	11,4	2,30	1,46
20	4,75	4,00	4,35	4,5	11,0	3,08	1,41
25	4,60	4,10	4,25	4,3	10,8	3,85	1,39
30	4,15	3,90	4,00	4,0	10,5	4,62	1,35

например, для всех грунтов с углами естественного откоса $m = \text{ctg} \theta \leq 3$ было принято $\lambda = 3$ с учетом результатов опытов В. А. Шаумяна при исследованиях водобойных колодцев. Эта величина, по-видимому, справедлива и для условий опытов Е. Я. Фроликовой¹. Величины K , подсчитанные по формулам (3), (4) и (5) при $\lambda = 3$ и при разных углах β° и величинах x , приведены в табл. 2.

Таблица 2

α°	β°	x						K , рекомендо- ванный нами ранее для схемы рис. 1
		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
0	0	1,34	1,34	1,31	1,28+	1,10	0,95	1,3
12	10	1,69	1,72	1,73	1,71	1,58	1,44+	1,7
25	20	2,02	2,09	2,13	2,15	2,02	1,92+	2,1
40	30	2,34	2,44	2,51	2,55	2,45	2,37	2,5
50	40	2,63	2,75+	2,84	2,92	2,83	2,78	2,8
—	50	2,91	3,01+	3,14	3,22	3,17	3,13	—
68	60	3,07	3,24+	3,38	3,49	3,43	3,42	3,2
—	70	3,26+	3,41	3,55	3,67	3,64	3,62	—
—	80	3,31+	3,41	3,65	3,79	3,76	3,76	—
90	90	3,35+	3,54	3,70	3,82	3,80	3,80	3,4

¹ Тем не менее дальнейшие исследования должны еще более точно установить величину λ . Обработка опытов А. Н. Рахманова, М. Ф. Складнева и др. (Изв. ВНИИГ*, т. 55, М.—Л., 1956) в условиях свободного незатопленного гидравлического прыжка в горизонтальном неразмываемом русле привела нас к зависимости $\lambda_b = \frac{(\tau_1 - 2,6)^{0,64}}{0,051 \tau_1}$,

где $\tau_1 = \frac{h_c^*}{h_c}$.

На рис. 3 воспроизведен график экспериментальной зависимости $K = f(\beta^\circ)$, полученный Е. Я. Фроликовой (кривая 1) в гидротехнической лаборатории САНИИРИ при размыве песка. Сравнивая опытную кривую с данными табл. 2, если принять $\beta^\circ = \alpha^\circ$ (на основании указанного выше), можно заметить, что экспериментам отвечают значения K , взятые в таблице в рамку и помеченные знаком плюс (как в таблице, так и на рис. 3). Следовательно, при малых α° величина $x = 0,8 \div 1$, а при больших α° $x = 0,5 \div 0,6$. При этом в условиях малых α° это совпадение происходит даже без учета пульсации направления динамической оси, т. е. без учета пульсации угла β° , тогда как при больших углах ее требуется учитывать. Совершенно очевидно, что в расчет надо вводить значение коэффициента K для увеличенного угла. Достаточной оказывается оценка увеличения β° на 10° . Принятие $\beta_1 = \beta^\circ + 10^\circ$ при $x = 0,5$ для $\beta^\circ > 70^\circ$ и $x = 0,6$ при β° от 40 до 70° сближает расчет с опытом (на рис. 3 точки смещаются влево и показаны знаками плюс). Для зоны с переменным режимом величины K берутся непосредственно (без поправки) из графика ($K = 2,3$ при 25°). Для инженерных расчетов следует пользоваться верхней ветвью кривой, отвечающей донному режиму сопряжения и дающей большие величины коэффициента K и соответственно большие величины t для расчета надежной глубины заложения фундамента сооружения.

Несомненно, исследование следует продолжить, причем свойства размываемого грунта надо учитывать более детально, по комплексной характеристике, рекомендованной Н. Н. Суровой [20]. В этом состоит, по нашему мнению, дальнейшая задача по учету свойств грунта при размывах. Что же касается предложения В. С. Гвоздева [9], то его едва ли можно считать достаточным для широкого использования при проектировании и расчетах. Действительно, В. С. Гвоздев на основе изучения размывов за плотинами на реках Урала и на основе сопоставления нашей формулы (1) с формулой проф. А. Н. Патрашева

$$t = \frac{3,9}{\sqrt[4]{d}} \sqrt[5]{q \sqrt{Z_0}} \quad (7)$$

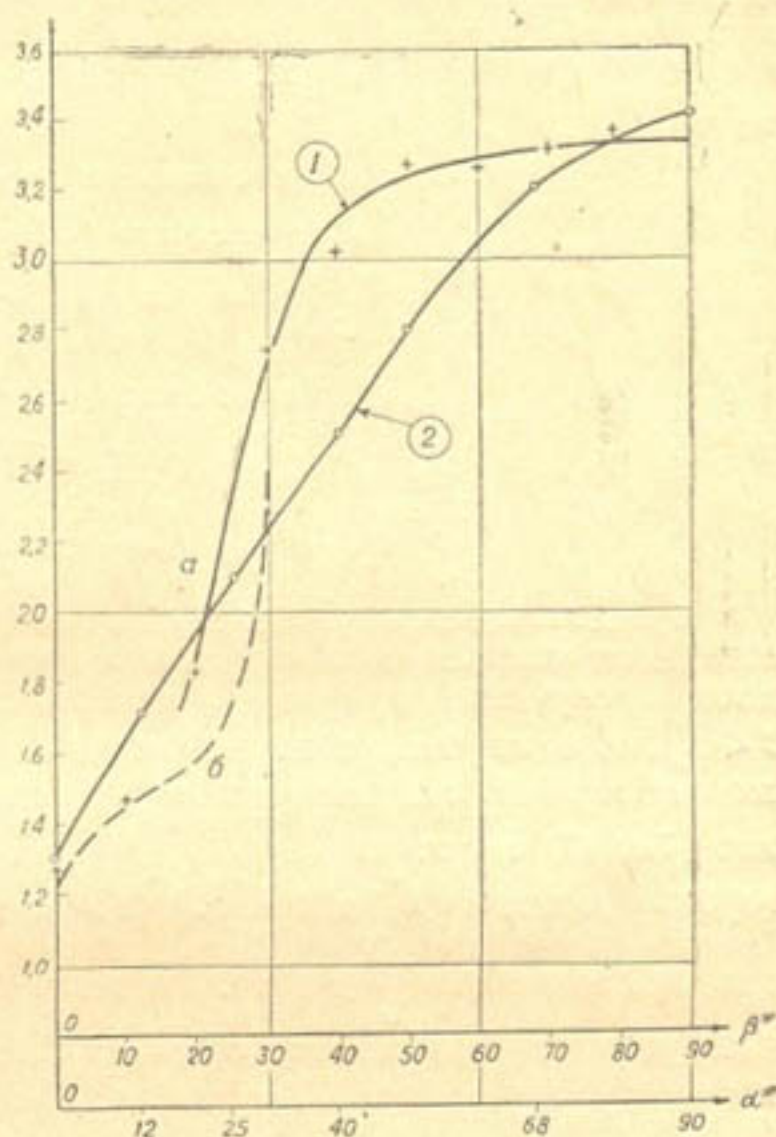


Рис. 3. График $K = f(\beta^\circ)$:

1 — опытная кривая Е. Я. Фроликовой; a — донный режим; b — поверхностный режим; 2 — расчетная кривая М. С. Вызго для условий рис. 1, при $n = 3$ и различных x .

получил при $\alpha^\circ = 25^\circ$ для коэффициента размыва соотношение

$$K = \frac{1,64}{d^{0,25}}, \quad (8)$$

где d — средняя крупность зерен сыпучего (несвязного) грунта в миллиметрах. По признакам одинаковости допустимых скоростей он произвел сравнение грунтов и рекомендует следующие величины коэффициента K :

Для связных грунтов

Слабые грунты	$K = 3,5$
Супесь	$K = 2,0$
Лесс плотный	$K = 1,5$
Глина	$K = 1,2$

Для несвязных грунтов

Пыль и ил	($d = 0,02$ мм)	$K = 4,4$
Песок мелкий	($d = 0,15$ мм)	$K = 2,6$
Песок крупный	($d = 2,00$ мм)	$K = 1,5$
Гравий	($d = 7,00$ мм)	$K = 1,0$

При дальнейшем увеличении d коэффициент K , по формуле (8), еще более уменьшается и становится меньше единицы ($K < 1$). В подобных случаях формула (8) при подстановке в формулу (1) дает $t < h_c^*$, т. е. глубину в зоне размыва меньшую, чем вторая сопряженная глубина гидравлического прыжка. Действительно, в формулах (1) и (7) величина $\sqrt{q} \sqrt{Z_0}$ примерно равна второй сопряженной глубине прыжка h_c^* для погонного расхода q при обычных величинах Z_0 (когда $\eta = \frac{h_c^*}{h_c} > 2,6$). Величина $K < 1$ (точнее $K < 0,95$) отвечает условию незатопленного гидравлического прыжка, скорости при котором очень велики ($V = \varphi \sqrt{2gZ_0}$) и размыв неизбежен даже в более прочном грунте, чем гравий диаметром $d = 7$ мм (для него, по Гвоздеву, $K = 1$). Например, акад. В. В. Пославский привел описание глубокого размыва скального грунта при $\alpha^\circ \cong 25^\circ$. При этом потоком вырывались глыбы скалы весом до 15 т. Известно и разрушение крепления, выполненного из штучного гранитного камня весом до 2 т каждый, за Ассуанской плотиной на р. Нил. В 1903 г., вскоре после начала эксплуатации, это мозаичное, сцементированное крепление было повреждено потоком. Камни пришли во вращательное движение; истираясь сами и истирая более слабое скальное основание, они создали размывы (углубления дна, котлы) местами до 10 м глубиной. Описывая это явление, М. Макдональд отметил, что после истирания размер штучных камней крепления настолько уменьшился, что „наиболее тяжелый из них мог поднять и увести один человек“. Именно поэтому рекомендуемыми В. С. Гвоздевым величинами K не следует пользоваться при расчетах сооружений, отличающихся от исследованных им на реках Урала.

Поскольку в условиях опытов Е. Я. Фроликовой [25, 26] под струей было пониженное давление (что увеличивало угол β°), впредь до получения новых данных (пространственные условия и даже условия плоской задачи, но с реальной аэрацией струи) можно считать достаточной для практики точность кривых типа 2 на рис. 3. Теперь

совершенно ясно, что необходимо учитывать макропульсацию угла β° , а потому при расчетных углах $\beta^\circ > 30^\circ$ надо вводить поправку $\Delta\beta^\circ \approx 10^\circ$ (например, если по расчету будет получена $\beta^\circ = 50^\circ$, то коэффициент K по кривой 2 рис. 3 должен отвечать углу $\beta^\circ = 50 + 10 = 60^\circ$, т. е. $K = 3,05$).

Эти рекомендации относятся к случаям размыва „прочных грунтов“ ($\lambda \approx 3$). Для других грунтов требуется уточнение, поэтому необходимы дальнейшие исследования, которые помогут расчленить влияние β° и свойств грунта, т. е. позволят представить величину K в виде произведения $K = K_\beta K_M = f(\beta^\circ, M)$, где M — комплексная характеристика грунта (размываемого материала)¹.

Отметку низа зуба сооружения (фундамента) следует назначать на основе общеизвестных требований. При проектировании сооружения надо вводить конструктивные устройства на его водоскате и водобое для увеличения аэрации (уменьшения коэффициента A) и устранения сбойности (уменьшения коэффициента σ). Как показали наблюдения за подпорными сооружениями на канале Клыч-Ниязбай в Южном Хорезме и за Иолотанской плотиной на р. Мургаб, где не были приняты необходимые меры, коэффициент сбойности достигал $\sigma = 2$ и даже $\sigma = 3$. Специальные конструкции нужны и для выравнивания или уменьшения погонного расхода (за счет расщепления потока на струи).

Гребенчатые трамплины, рассеивающие виражи, балки-расщепители и другие конструкции уменьшают A , σ , K и t или совсем предохраняют от разрушений. Это удешевляет основания и береговые крепления и, кроме того, делает их более надежными в эксплуатации (перепады — быстроток на Южном Ферганском канале, Ташкепринская плотина на р. Мургаб, вираж на сбросе Орто-Токойского водохранилища на р. Чу, Яломинская консоль и водосброс Ак-Кавакской ГЭС на канале Бозсу, Кызыл-Ординская плотина на Сыр-Дарье и многие другие).

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриевская А. Б. О донном и поверхностном режимах в нижнем бьефе сооружений при истечении жидкости с уступа, Научные записки МИИВХ им. В. Р. Вильямса, т. 18, М., 1955.
2. Беспалова В. Г. Исследование закономерности распространения свободных струй с помощью гидроинтегратора, Вестник АН КазССР*, 1959, № 6.
3. Востржел Г. В. О расчетных зависимостях для свободной струи, Изв. ВНИИГ*, 1954, т. 52.
4. Вызго М. С. К рационализации конструкций гидротехнических сооружений, Ирригация и гидротехника*, 1935, № 6.
5. Вызго М. С. К вопросу о местных размывах, Гидротехническое строительство*, 1940, № 9.
6. Вызго М. С. Размыв скального грунта, Изв. АН УзССР*, 1947, № 6.
7. Вызго М. С. Процесс размыва грунтов и предохранение плотин, Изв. АН УзССР*, 1952, № 6.
8. Вызго М. С. и Филиппов Е. Г. Растекание струи и размыв несвязного грунта, Изв. АН УзССР*, 1956, № 5.
9. Гвоздев В. С. Пути улучшения конструкции низконапорных плотин, М., Госстройиздат, 1952.
10. Грицук А. В. Механизм и теория прыжка потока жидкости, М., 1932.
11. Дадабаев К. Б. Мероприятия по защите нижнего бьефа от размыва, Гидротехническое строительство*, 1955, № 7.

¹ Совершенно правильно в этом направлении ведутся работы М. А. Михалевым [16], А. И. Тлеукабыловым, Е. В. Плетневой и др.

12. Деметьев М. И. и Горюнов С. И. Расчет давления фильтрационного потока, создаваемого в грунте струей гидромонитора, „Изв. ВНИИГ“, 1950, т. 49.
13. Левицкий Б. Ф. О гашении энергии струи потока при расщеплении ее на отдельные струйки, „Доклады Львовского политехнического института“, т. 1, вып. 1, 1955.
14. Маккавеев В. М. и Коновалов И. М. Гидравлика, Л., Трансжелдориздат, 1940.
15. Милович А. Я. Гидродинамические основы газовой борьбы, Новочеркасск, 1918.
16. Михалев М. А. Гидравлика струи, сбрасываемой с консольного перепада, Научно-технический информационный бюллетень Ленинградского политехнического института, „Гидротехника“, 1958, № 1—2.
17. Осипов В. Б. Некоторые вопросы гидродинамического воздействия потока на размыв в нижнем бьефе плотин и гидростанций, Автореферат кандидатской диссертации, Алма-Ата, АН КазССР, 1953.
18. Патрашев А. Н. Определение максимальной глубины размыва грунта, производимого ниспадающей струей, „Изв. ВНИИГ“, 1937, т. 29.
19. Пославский В. В. Размыв скалы в нижнем бьефе водосливной плотины, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. 1, 1949.
20. Сурова Н. Н. Вопросы методики моделирования размыва русла (учет пористости размываемого материала), В сб.: „Русловые процессы“, М., АН СССР, 1958.
21. Сурова Н. Н. К вопросу о местном размыве за горизонтальным креплением, „Гидротехническое строительство“, 1957, № 2.
22. Сурова Н. Н. Рассеивающий вираж радиального очертания, „Гидротехническое строительство“, 1955, № 7.
23. Сурова Н. Н. К вопросу о методике моделирования местных размывов за гидротехническими сооружениями, ДАН УзССР, 1955, № 11.
24. Теперин Н. И. Движение струи в массе жидкости, Труды САНИИРИ, вып. 10, 1933.
25. Фроликова Е. Я. Поверхностный и донный режим сопряжения и размыв грунта наклонной струей, „Гидротехническое строительство“, 1957, № 2.
26. Фроликова Е. Я. Влияние направления динамической оси потока на размыв грунта, ДАН УзССР, 1956, № 8.
27. Цветков П. К. Исследование поверхностного режима за донным порогом, установленным на водобое плотины, „Изв. Института гидрологии и гидротехники АН УССР“, 1955, т. 12.
28. Чертоусов М. Д. Гидравлика (специальный курс), М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
29. Чабелка Я. Потери механической энергии в переливающейся через водослив струе при высоконапорных плотинах, „Vodohospodársky Časopis“, Словенская Академия наук, Братислава, вып. 2, 1956.
30. Einwachter I. „Wehre und Sohlenabstürze“, Карлсруе, 1930.

Т. Х. АХМЕДОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСА РАЗМЫВА ПРИ СОПРЯЖЕНИИ БЬЕФОВ СВОБОДНО ОТБРОШЕННОЙ С НОСКА ПЛОТИНЫ СТРУЕЙ

При проектировании водосливных плотин необходимо знать не только величину возможной глубины размыва дна в нижнем бьефе, но и расстояние от плотины до наиболее глубокой точки размыва (фокуса размыва).

П. Г. Киселев [1, стр. 226] для плотин с носком при сопряжении бьефов свободно отброшенной струей рекомендует находить эту величину по формуле для дальности отлета струи

$$L = 2 \cdot \varphi^2 \cdot n \cdot S \cdot \cos \alpha^\circ \left(\sin \alpha^\circ + \sqrt{\sin^2 \alpha^\circ + \frac{h_n \cdot \cos \alpha^\circ + 2S(1-n)}{2\varphi^2 \cdot n \cdot S}} \right), \quad (1)$$

где φ — коэффициент скорости;

$$n = \frac{S_1}{S};$$

S_1 — расстояние от горизонта воды верхнего бьефа до носка (по вертикали);

S — расстояние от горизонта воды верхнего бьефа до дна нижнего (полный напор);

α° — угол наклона носка плотины к горизонту.

Син Тхэ Гон [3], проводивший исследование такого типа сооружений на модели с неразмываемым руслом в условиях, когда дно модели не оказывало существенного влияния на динамическую ось потока, подтверждает возможность применения этой формулы.

В целях проверки применения формулы (1) для гидравлического расчета в условиях размываемого русла, т. е. при схеме, изображенной на рис. 1, нами в 1959 г. были поставлены опыты на крупномасштабной модели водосливной плотины в гидротехнической лаборатории Института энергетики АН КазССР. Модель позволяла экспериментировать при напорах $S \leq 2,3$ м и расходах $Q \leq 60$ л/сек, т. е. $q \leq 200$ л/сек = $0,2$ м³/сек/пог.м. Опыты проводились в лотке шириной 30 см и длиной около 10 м. Водосливная часть плотины и ее носок выполнены из листового алюминия, стенки лотка в этой части были прозрачными (органическое стекло), стенки русловой части модели — бетонными. Низовая часть плотины и носок снабжены устройством для измерения давления потока на дно. Русло во всех опытах сложено из песка диаметром $d = 0,5 - 1,6$ мм. В формулу (1) входит коэффициент скорости φ , учитывающий потерю энергии на сливной грани плотины. Величина коэффициента φ зависит от удель-

ного расхода потока, напора, шероховатости водослива, аэрации и т. д. Обычно в расчетах принимают $\varphi = 0,85 \div 0,95$, что, как показали опыты многих авторов [3], неправильно. Коэффициент φ для условий

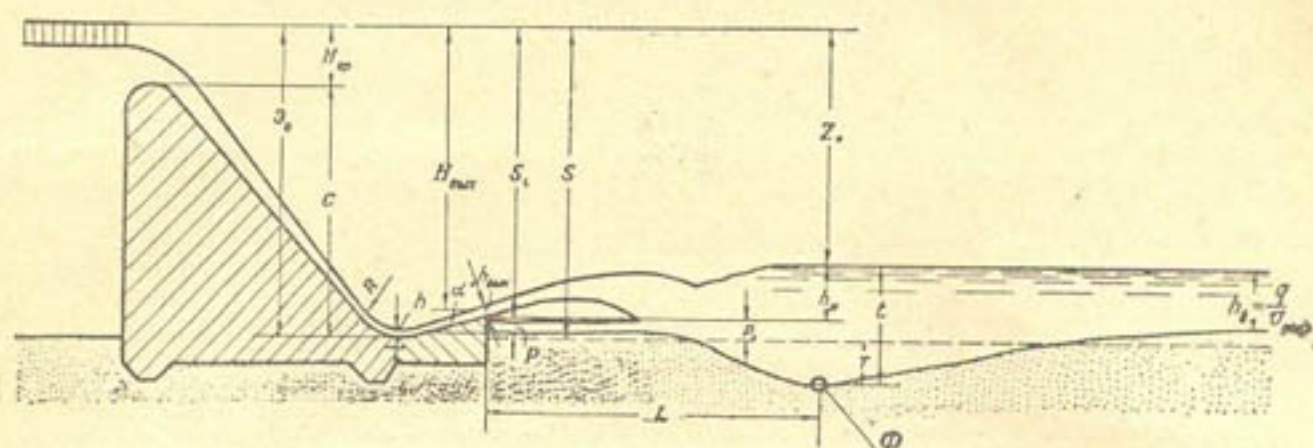


Рис. 1. Общая схема. Обозначения:
 Φ — фокус размыва; пунктир — дно русла до размыва.

наших опытов может быть найден из зависимости

$$\varphi = \frac{q}{h \cdot \sqrt{2g(H_{гр} + C - h)}}. \quad (2)$$

Обозначения ясны из рис. 1.

В наших опытах при $q = 0,133 \text{ м}^3/\text{сек}$, $H_{гр} = 0,14 \text{ м}$, $C = 2,245 \text{ м}$ и $h = 0,024$ было получено φ , равное 0,80.

Приняв это значение коэффициента скорости, подсчитаем величину $L_{расч}$ по формуле (1):

Номер опыта	α°	$H_{вых}$ м	P м	$h_{вых}$ м	$L_{расч}$ м	$L_{оп}$ м	$\frac{L_{оп} - L_{расч}}{L_{расч}}$	Примечание
24	10	2,202	0,135	0,032	1,50	2,29	52,7	$Q = 40 \text{ л/сек}$
36	15	2,119	0,210	0,034	1,95	2,76	41,6	$H_{гр} = 0,14 \text{ м}$
40	20	2,051	0,280	0,036	2,28	2,88	26,3	$C = 2,245 \text{ м}$ $\varphi = 0,8$

Если теперь сопоставить $L_{расч}$ с наблюдаемой в опыте длиной $L_{оп}$ то, как видно из рис. 2, расчет дает точку, приблизительно соответствующую началу размыва. Этого и следовало ожидать, так как формула (1) была получена для других расчетных условий (неразмываемое русло). Кроме того, при растекании струи в массе воды нижнего бьефа траектория центральной струйки отклоняется от расчетной и становится более пологой, тем самым и максимальная глубина размыва отодвигается от сооружения. На основе наших опытов (рис. 2) можно сделать вывод, что

$$L_{оп} = L_{расч} + T \cdot \text{ctg} \beta^\circ, \quad (3)$$

где β° — угол, примерно равный углу заложения верхового откоса ямы размыва;

T — глубина ямы размыва, определяемая из соотношения

$$T = t - p - h_n.$$

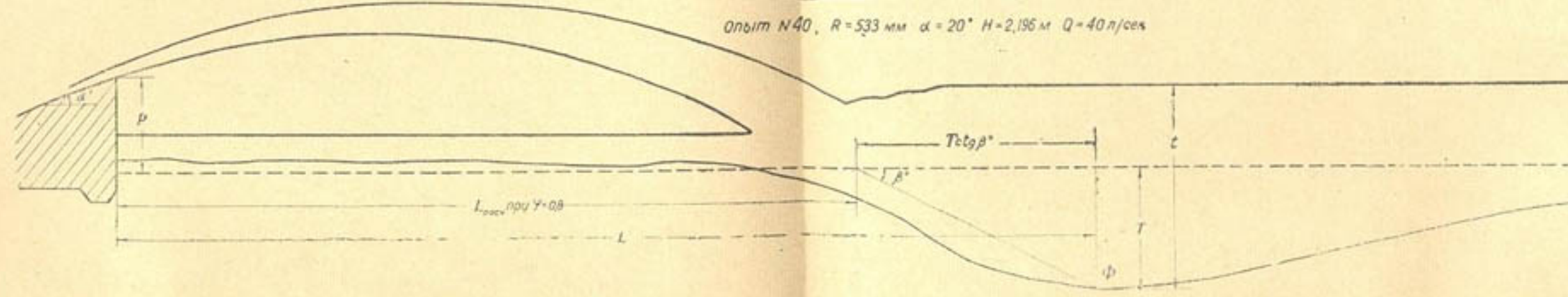
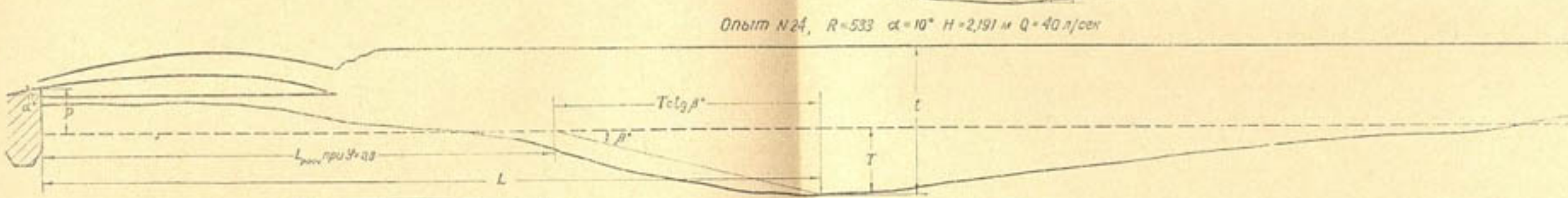
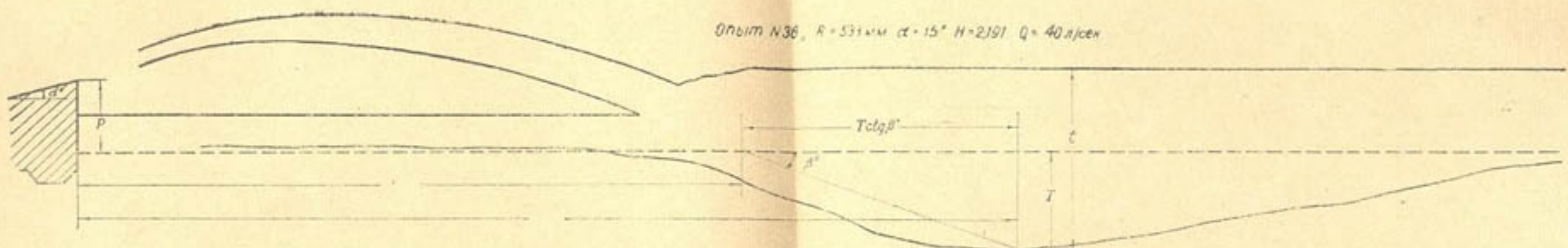


Рис. 2.

Глубину размыва t можно найти, как показали и наши опыты по формуле М. С. Вызго [2,4—7]:

$$t = K \sqrt{q \sqrt{\mathcal{E}_0}} = (1,34 + 2 \sin \alpha^\circ) \cdot \sqrt{q \sqrt{\mathcal{E}_0}}. \quad (4)$$

Поэтому зависимость для определения расстояния фокуса размыва от сооружения следует представить в виде

$$L = 2\varphi^2 \cdot n \cdot S \cdot \cos \alpha^\circ \left(\sin \alpha^\circ + \sqrt{\sin^2 \alpha^\circ + \frac{h_n \cos \alpha^\circ + 2S(1-n)}{2\varphi^2 \cdot n \cdot S}} \right) + \\ + (K \sqrt{q \sqrt{\mathcal{E}_0}} - P - h_n) \operatorname{ctg} \beta^\circ. \quad (5)$$

Величину коэффициента φ в реальном проектировании можно вычислить по формуле, предложенной Син Тхэ Гоном [3],

$$\varphi = 1,88 \frac{H}{S_1} + 0,44. \quad (6)$$

Угол β° приближенно принимается таким:

α°	10	15	20
β°	14	20	27

или по зависимости

$$\beta^\circ \approx 1,4\alpha^\circ. \quad (7)$$

Отметим, что на величину угла β° будут, по-видимому, оказывать влияние свойства грунта, слагающего русло в зоне размыва. Уточнение этого влияния требует постановки дополнительных опытов в аналогичных условиях, но с другими грунтами основания.

В настоящее время существует мнение, что высокие носки позволяют отбросить струю на большее расстояние, чем низкие. Для проверки этого положения примем высоту уступа $P_1 = P + T$, подсчитаем величину $L_{\text{расч}}$ и сделаем следующие сравнительные расчеты:

Номер опыта	α°	$H_{\text{вых}},$ м	$T^*,$ см	$P,$ см	$P_1,$ см	$L_{\text{расч}}$	$L_{\text{оп}}$
24	10	2,01	19,2	13,5	32,7	1,82	2,29
36	15	1,83	29,0	21,0	50,0	2,20	2,76
40	20	1,69	35,6	28,0	63,6	2,42	2,88

Обозначения приведены на рис. 1.

Как видим, величина $L_{\text{расч}}$, полученная при такой высоте уступа, несколько меньше (на 10%), чем $L_{\text{оп}}$. Если учесть, что в этом случае угол входа струи в нижний бьеф будет больше, чем в первой схеме, то расстояние фокуса размыва от сооружения можно считать почти не увеличивающимся, а глубину размыва, по-видимому, возрастающей. Как показали наши опыты, глубина размыва несколько возрастает (хотя фокус заметно удаляется) и при устройстве на конце носка

* Взято из опыта.

дополнительно приподнятого носочка (порога). Такая конструкция была принята в проекте одной из плотин в Казахстане. Однако в этом случае на носке развиваются чрезвычайно большие давления потока, опасные для целостности водобойной части плотины. Отдаление фокуса размыва целесообразнее обеспечивать не таким носочком-порогом, а соответственным наклоном (α°) носка плотины.

ВЫВОДЫ

1. Формула (1) не может быть применена для определения расстояния фокуса размыва. Эту величину можно определить по формуле (5).

2. Величину угла β° (в схемах, аналогичных расчетной) в первом приближении можно принимать по зависимости (7). Для ее уточнения необходимо проведение дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам, Плотина с носком на водосливной грани, гл. 9, § 7, М. — Л., Госэнергоиздат, 1957.
2. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения, ч. 1, гл. 8, § 42, М., Госиздат по строительству и архитектуре, 1954.
3. Син Тхэ Гон. Исследование устройств нижнего бьефа высоких водосливных плотин со свободным отлетом струи, Автореферат диссертации, М., МИСИ им. В. В. Куйбышева, 1959.
4. Пославский В. В. О размыве скалы в нижнем бьефе водосливной плотины, Труды Института сооружений и строительных материалов АН УзССР, вып. 1, Ташкент, 1949.
5. Вызго М. С. О размывах скального русла за плотинами и о методике их исследований, Изв. АН УзССР, 1956, № 3.
6. Смольянинов Н. Т. Результаты лабораторного изучения местного размыва при сопряжении бьефов, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. 3, Ташкент, 1952.
7. Алтуни С. Т. Результаты полевых исследований русловых процессов у крупного гидроузла, Труды Института сооружений АН УзССР, вып. 8, Ташкент, 1958.

ОТ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Помещая статью Т. Х. Ахмедова в данном сборнике, редколлегия считает нужным указать на важность рассматриваемого в статье вопроса, тем более, что П. Г. Киселевым [1] приведен недостаточно точный способ расчета глубины местного размыва скального грунта. Одновременно необходимо отметить, что из работы академика В. В. Пославского [4], описавшего размывы скального грунта за плотиной, видно, что подмыв может наблюдаться в сторону плотины; тогда этот участок размыва приходится закреплять.

Вопрос о размывах скальных грунтов еще недостаточно изучен и продолжает изучаться. При таких исследованиях необходимо изучать процесс истирания дна, т. е. учитывать абразивные свойства продуктов размыва и транзитных наносов. На глубину и форму размыва влияют форма и размеры гряды отложений из продуктов разрушения, вынесенных из ямы размыва (в процессе эксплуатации эта гряда может быть смыта потоком). Иногда за грядой может возникать вторичный перепад и вторичный размыв, а также общие деформации русла ввиду аккумуляции наносов перед плотиной [7]. В [1а] даны результаты лабораторных исследований ВНИИГ по определению глубины размыва скального грунта и коэффициента скорости φ и отмечено, что его значения находятся в пределах от 0,60 до 0,95.

Кроме того, ряд полезных (для проектирования и эксплуатации плотины) данных приведен в статье Н. Энгеца [2а]. В этой статье имеются ссылки на работы Я. Чабелка (Чехословакия), Элеваторского (США) и др.

1а. Аннотации законченных в 1958 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике, М. — Л., Госэнергоиздат, 1959.

2а. Englez Necoti. Betrachtungen über die Hochwasserüberfälle in Bauart Sprungschanze bei der neuen Elmalı Talsperre (Istanbul), Die Bautechnik, Berlin, 10, 1959.

Член-корр. АН УзССР М. С. ВЫЗГО

РЕФЕРАТ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СТАТЬЯМ А. ШОКЛИЧА И П. ФРАНКЕ¹

В статье проф. А. Шоклича рассматриваются случаи размыва бурным потоком, когда в пределах водобоя не образуется затопленного гидравлического прыжка (рис. 1). Величина размыва считается

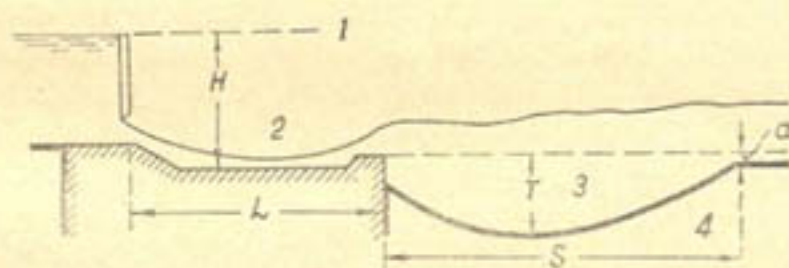


Рис. 1. Размыв за плотиной:

1 — линия энергии; 2 — флютбет (водобой); 3 — вымощина;
4 — зернистый грунт.

зависящей от расхода воды и распределения его по водосливному фронту, от высоты падения (напора H), от конструкции флюتبета и расположения его над дном водотока, от соотношения ширины русла и сооружения, от конструкции сопряжения береговых устоев сооружения с берегами русла, от характера пропуска воды через многопролетные сооружения, от длительности пропуска того или иного расхода воды (гидрограф), от наличия или отсутствия транзитных наносов.

При наличии транзитных наносов размыв меньше, но расчетных связей А. Шоклич не дает. Формула дана для расчета глубины размыва чистой водой и отвечает периоду аккумуляции наносов в верхнем бьефе. Глубина размыва T определяется ниже отметки дна короткого водобоя, причем считается, что длина его в пределах L от $1,5 H$ до $2,5 H$ не влияет на глубину местного размыва. Свойства размываемого грунта оцениваются величиной q_0 , т. е. таким удельным (погонным) расходом воды, который в данных конкретных условиях не вызывает размыва русла.

¹ А. Шоклич. Расчет глубины размыва за плотиной, „Wasser und Energiewirtschaft“, 1951, № 2. П. Г. Франке. О картине и форме размывов. „Österreichische Wasserwirtschaft“, 1960, № 1.

Формула для расчета имеет вид

$$T = 4,5 \varphi \beta \left(\frac{\Sigma b}{B} \right)^{\frac{1}{4}} \tau^{\frac{1}{6}} H^{\frac{1}{2}} \left(q^{\frac{1}{3}} - q_0^{\frac{1}{3}} \right) + 2,15a, \quad (1)$$

- где B — ширина русла ниже сооружения, м;
 Σb — суммарная ширина пролетов плотины в свету, м;
 τ — длительность воздействия удельного расхода на русло по гидрографу, час;
 q — удельный (погонный) расход воды на сливе, м³/сек;
 H — напор на сооружении (разность отметок горизонта воды верхнего бьефа с учетом подходной скорости и наименьшей отметки флютбета в нижнем бьефе), м;
 a — высота конца флютбета над дном отводящего русла (берется с плюсом, когда дно русла ниже, и с минусом, когда дно русла выше дна крепления), м;
 φ — коэффициент, зависящий от конструкции флютбета (для схем рис. 2 значения φ приводятся в табл. 1);
 β — коэффициент, учитывающий различную степень размыва у берегов и в осевой части плотины (даются величины β для трехпролетного сооружения с плавнообтекаемой формой бычков при ширине русла, равной ширине сливного фронта). Значения β приведены в табл. 2. Влияние a показано на рис. 3.

А. Шоклич указывает, что по формуле (1) определяется средняя расчетная глубина размыва и что в многопролетных сооружениях в зависимости от маневрирования затворами в отдельных местах русла действительные глубины могут отличаться на $\pm 25\%$. Одинаковое открытие пролетов плотины не предохраняет от асимметрии размыва. Он обращает внимание на недопустимость создания наклонного по течению крепления, приводящего к очень большим размывам. Горизонтальное крепление отклоняет поток в случае, если его длина $L = 1,5 H$.

Особо отмечается влияние планового расположения сооружения, очертания русла и его берегов. На примере плотины на р. Тайя (Тауа) показывается неравномерность размывов, вызываемых сбойностью течения (рис. 4).

Большое влияние сбойности и концентрации расхода воды обнаружилось и при лабораторных исследованиях в САНИИРИ первоначальных проектов многопролетной Кзыл-Ординской плотины (опыты 1940—1941 гг.) и трехпролетного головного водозаборного сооружения канала им. С. М. Кирова в составе сооружений напорно-станционного узла Фархадской ГЭС (опыты 1942—1943 гг.). Поэтому в проекты этих сооружений нами было рекомендовано введение конструктивных устройств (осуществленных при строительстве), предназначенных для выравнивания погонных расходов на выходе из сооружения в русло (реки и канала). На водоскате Кзыл-Ординской плотины было установлено 3 ряда высоких зубчатых порогов (разрезных трамплинов), отклоняющих донные струи к поверхности и заставляющих сосредоточенный поток, выходящий из тех или иных водосбросных и промывных устройств (центральные сбросные пролеты, берего-

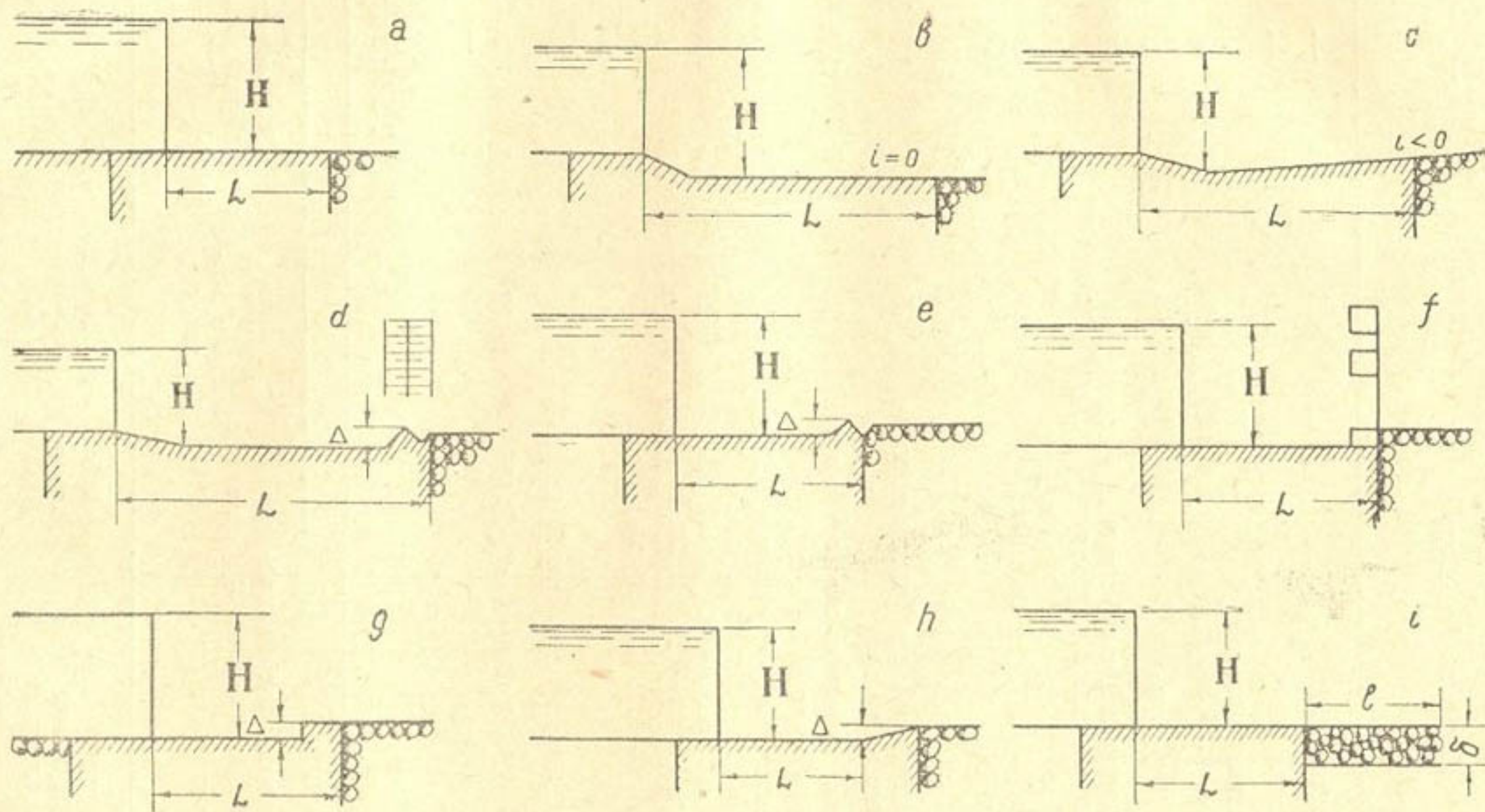


Рис. 2. Конструкции исследованных водобоев.

вые донные промывные галереи), растекаться на всю ширину сливного фронта плотины. Раздельные стенки и пирсы на водобоях указанных

Таблица 1

Обо- значе- ния рис. 2	Профиль флютбета	Число опытов	$\frac{L}{H}$	$\frac{\Delta}{H}$	φ
<i>a</i>	горизонтальный	303	1,5	—	0,36
<i>b</i>	горизонтальный	167	2,5	—	0,30
<i>c</i>	с обратным уклоном				
	1:28,5	60	2,5	—	0,26
	1:19	30	2,5	—	0,26
	1:14,3	39	2,5	—	0,28
<i>d</i>	горизонтальный, с зубчатым порогом Ребока (Δ — высота зубьев)	46	2,5	0,037	0,25
		53	2,5	0,049	0,22
		131	2,5	0,061	0,21
		164	2,5	0,076	0,20
		72	2,5	0,092	0,19
		45	2,5	0,107	0,18
		114	2,5	0,122	0,17
<i>e</i>	горизонтальный, с зубчатым порогом (Δ — высота зубьев)	11	1,5	0,039	0,30
		14	1,5	0,057	0,23
<i>f</i>	зубчатый порог с прямоугольными зубьями (Δ — высота зубьев)	20	1,5	0,057	0,18
<i>g</i>	горизонтальный, с прямоугольным порогом (Δ — высота порога)	15	1,5	0,029	0,35
		9	1,5	0,057	0,28
		12	1,5	0,086	0,24
<i>h</i>	горизонтальный, с трапецидальным порогом (Δ — высота порога)	9	1,5	0,029	0,32
		8	1,5	0,057	0,27
		5	1,5	0,086	0,20
		6	1,5	0,114	0,12
<i>i</i>	горизонтальный, с каменной набро- ской				
	$l = 1,0 H$; $6 = 0,18 H$	17	1,5	—	0,30
	$l = 1,5 H$; $6 = 0,275 H$	10	1,5	—	0,04

Таблица 2

Сбрасываемый расход рав- номерно распределяется через пролеты	β			
	левый берег	у низовой границы пло- тины	правый берег	в месте наибольшей глубины размыва
Все три	0,85	от 0 до 0,21	0,85	1,00
Средний и левый	0,75	0,75	0,75	1,00
Правый и левый	0,70	1,00	1,00	1,05
Средний и правый	1,00	1,00	0,70	1,05
Средний	0,85	0,80	0,85	1,07
Правый	0,85	0,95	0,95	1,00
Левый	0,95	0,95	0,85	1,00

объектов препятствуют концентрации расхода, возникающей в силу появления вихревых дорожек и понижения давлений в той или иной

части потока (в зонах соединения потоков, выходящих из одновременно открытых соседних пролетов), а также береговых суводей (водоворотов).

На консольном перепаде канала Джун в 1935 г. по нашему предложению установлены гребенчатые трамплины. Ленинградское

отделение Гидропроиза, обследовавшее это сооружение, констатировало в 1937 г.: „Благодаря наличию зубьев на конце консоли, при падении струя расчесывается и имеет рыхлый, вспененный вид. Размывов не наблюдается, сооружение работает хорошо. В железобетонных консольных перепадах весьма желательно устройство трамплинов“. Об этом же сооружении инж. Ю. И. Горский сообщил: „В 1935 г. мной был запроектирован и осуществлен гребенчатый трамплин конструкции

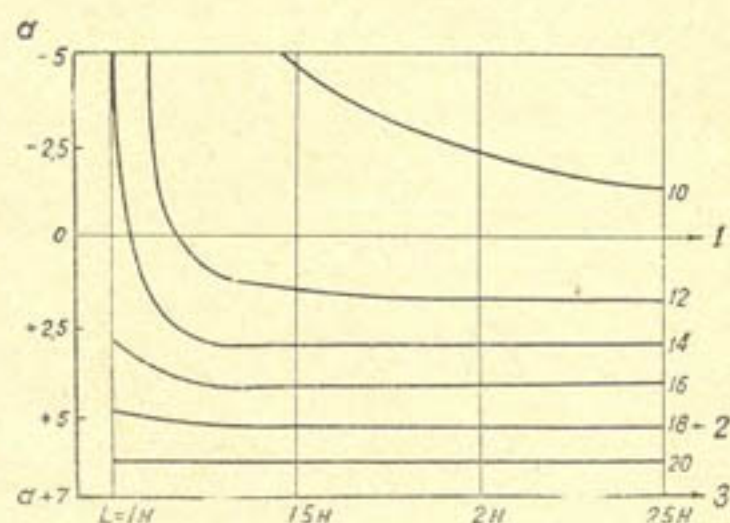


Рис. 3. Влияние длины флютбета L на глубину размыва:

1 — линия дна крепления; 2 — глубина размыва, см.

М. С. Вызго на консольном перепаде на пикете 2+47 канала К-59 ирригационной системы Новый Джун. Этот перепад построен взамен двух деревянных перепадов, один из которых стоял на месте построенного, второй на 150 м ниже. Суммарный их перепад был тот же, т. е. 5,5 м при примерно равных падениях на каждом. Грунт основания — лессовидные суглинки, просадочные. Старый деревянный перепад имел глубину размыва 5 м. Вновь построенный железобетонный перепад с гребенчатыми трамплинами, при тех же абсолютных и удельных расходах воды, при почти вдвое увеличенном падении, за год эксплуатации (осень 1936 г.) дал глубину размыва до 1,6 м, т. е. почти 30%. Сказалось действие гребенчатого трамплина“.

На водоскате перегораживающих сооружений (на 59-м и 71-м километрах Кировского магистрального канала в Голодной степи), построенных в 1926 г., за которыми происходили большие размывы и ежегодно тратились большие средства на ремонт, по нашему предложению в 1941 г. были поставлены зубья-трамплины по 2 в каждом из трех пролетов. Инж. Казголстепстроя М. З. Пупко в 1946 г. сообщил, что „предложенные рекомендации полностью осуществлены и оказались весьма эффективными“.

Водобой плотины им. 1-го Мая на р. Зеравшан от начавшихся разрушений защитили гребенчатые трамплины, установленные у подошвы водослива в 1940—1941 гг. Конструкция их была разработана в лаборатории САНИИРИ автором и инж. П. Ф. Чубукиным. Для защиты от истирания они облицованы (дерево и чугун). На этой плотине гребенчатый порог Ребока в конце водобоя не оказал заметного положительного влияния на гидравлические характеристики потока и гашение энергии и, будучи выполнен из штучных гранитных блоков, подвергался сильному износу от истирающего действия галечниковых наносов. Очень интересные и полезные исследования выполнены и в ряде других институтов и лабораторий, в том числе

в Институте гидрологии и гидротехники АН УССР (см., например, [18, 20, 29]), Тбилисском научно-исследовательском институте сооружений и гидроэнергетики [8], Казахском государственном сельскохозяйственном институте [16], ВОДГЕО [12], МИСИ [9].

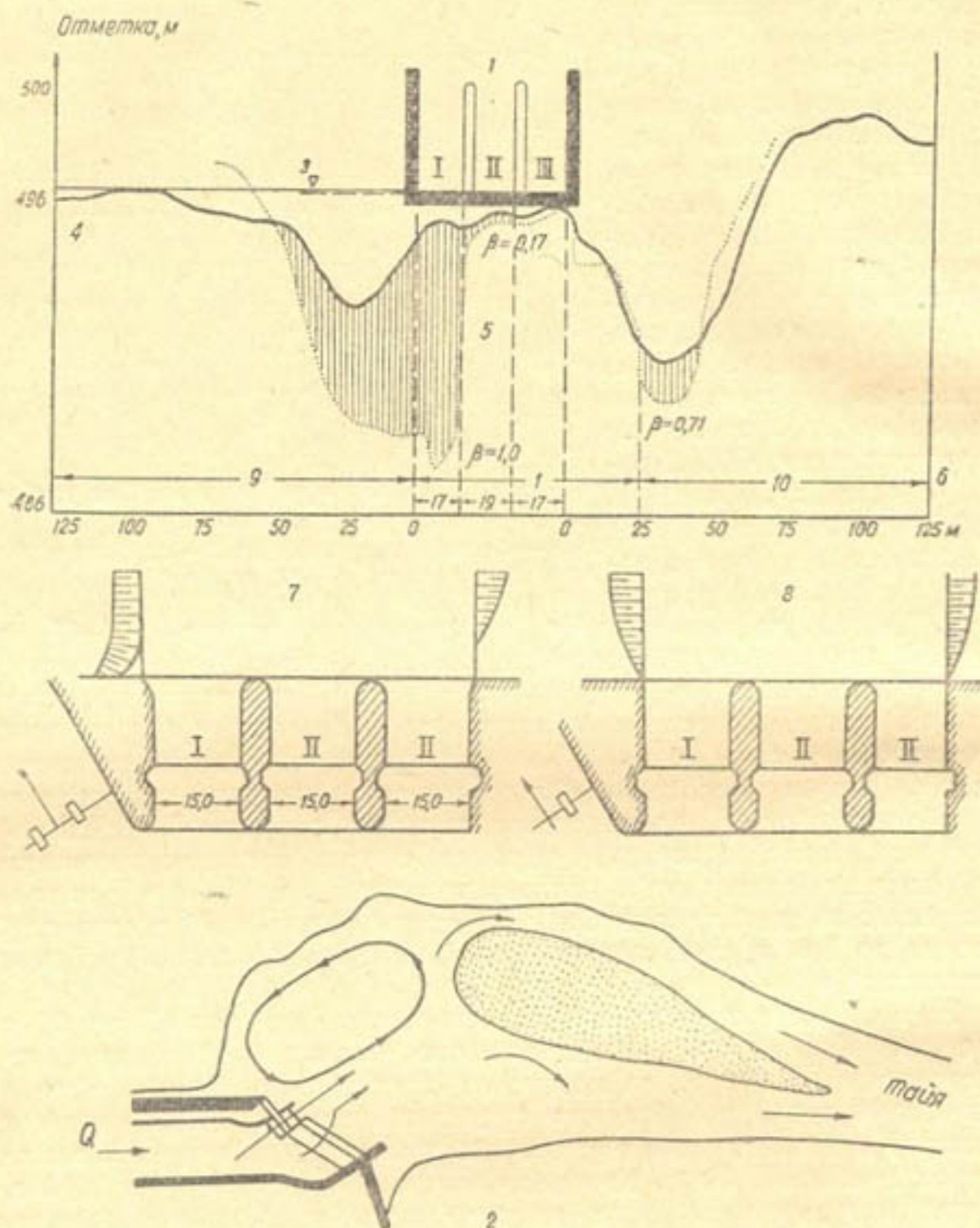


Рис. 4. Размыв берега у плотины на р. Тая вследствие образования бокового водоворота. $Q = 1675 \text{ м}^3/\text{сек}$:

1 — плотина; 2 — план русла; 3 — отметка дна сооружения 496,93; 4 и 5 — размытое дно при улучшенном (8) и первоначальном (7) сопряжениях плотины с откосами берегов; 6 — расстояние от створа плотины вниз по течению; 9 — левый берег; 10 — правый берег.

Правильное конструирование и расчет тех или иных мероприятий для защиты от разрушений и размывов требовали и требуют изучения структуры турбулентного потока, разработки теории взаимодействия

потока, русла и конструкции сооружения в различных условиях. К сожалению, некоторые авторы недостаточно правильно освещают эти вопросы (см. [5, 17, 27]).

Так, например, Н. Н. Пашков [17] без всяких к тому оснований пишет, что якобы "...ряд исследователей — М. С. Вызго, Н. Н. Сурова, О. В. Андреев и др. отказались по существу от эффективной борьбы с образованием сбойных течений, идут по пути исследования характеристик сбойного потока, увеличивая запасы в расчете воронок размыва, элементов крепления и берегов нижнего бьефа на случай образования сбойности".

Это далеко не так, если учесть результаты исследований, использованных при строительстве Кзыл-Ординской плотины, Ялломинской консоли, выража — водосброса Орто-Токойской плотины и многих других объектов (см. также [7]).

А. В. Троицкий [26], показав, что даже неверное использование нашей формулы без учета степени затопления τ гидравлического прыжка дает на основе опытов И. И. Леви расхождение всего около $\Delta t \approx 8\%$, отметил, что расходимость в величине ΔT достигает $\approx 39\%$. К сожалению, А. В. Троицкий не учел, что для более точного расчета в условиях затопленного прыжка необходимо вводить $\Delta h = h_2 - h_c$ и $\alpha_c = f(\tau)$ (рис. 8).

В нашей статье, рассмотренной им, это также не учтено. Кроме того, А. В. Троицкий, противопоставляя теоретические подходы к определению коэффициента K у И. И. Леви и М. С. Вызго, допустил методическую ошибку, поскольку они по существу исходят из рассмотрения одних и тех же главных гидродинамических характеристик, но выраженных в различной форме [заметим, что $\eta = f(Fr)$].

Н. Н. Беляшевский [5] допустил ошибку в применении некоторых формул к расчету размыва в условиях, для которых эти формулы (И. И. Леви, М. С. Вызго) не рекомендованы. Естественно, что "расчетные" и фактические данные получились с расхождением в два, шесть и даже 18 раз (1800%!). Формулы надо применять, не нарушая основных правил пользования ими, сообразуясь с физической стороной и схемой явления.

Основываясь на результатах своих лабораторных опытов, профессор А. Шоклич отмечает, что крупность зерен песка в русле больше влияет на длину ямы размыва, чем на глубину, и что при $H > 0,7$ м размер частиц в диапазоне $d = 1,5$ мм до $d = 17,2$ мм не влияет на изменение глубины размыва. Поэтому для практических расчетов А. Шоклич рекомендует писать формулу (1) в виде

$$T = 4,5 \varphi \beta \left(\frac{\Sigma b}{B} \right)^{\frac{1}{4}} \tau^{\frac{1}{6}} H^{\frac{1}{2}} q^{\frac{1}{3}} + 2,15a. \quad (2)$$

В этой формуле¹ первое слагаемое не зависит от свойств грунта (от него зависит только величина τ). Влияние грунта в какой-то мере учитывается вторым слагаемым, поскольку a предопределяется глубиной потока в русле, зависящей от свойств грунта. В рассматриваемой работе А. Шоклич не дает никаких указаний по этому вопросу,

¹ Формулы (1) и (2) отличаются от широко известной советским инженерам формулы А. Шоклича

$$T = 0,378 H^{0,5} q^{0,35} + 1,15 a, \quad (3)$$

приведенной в [6].

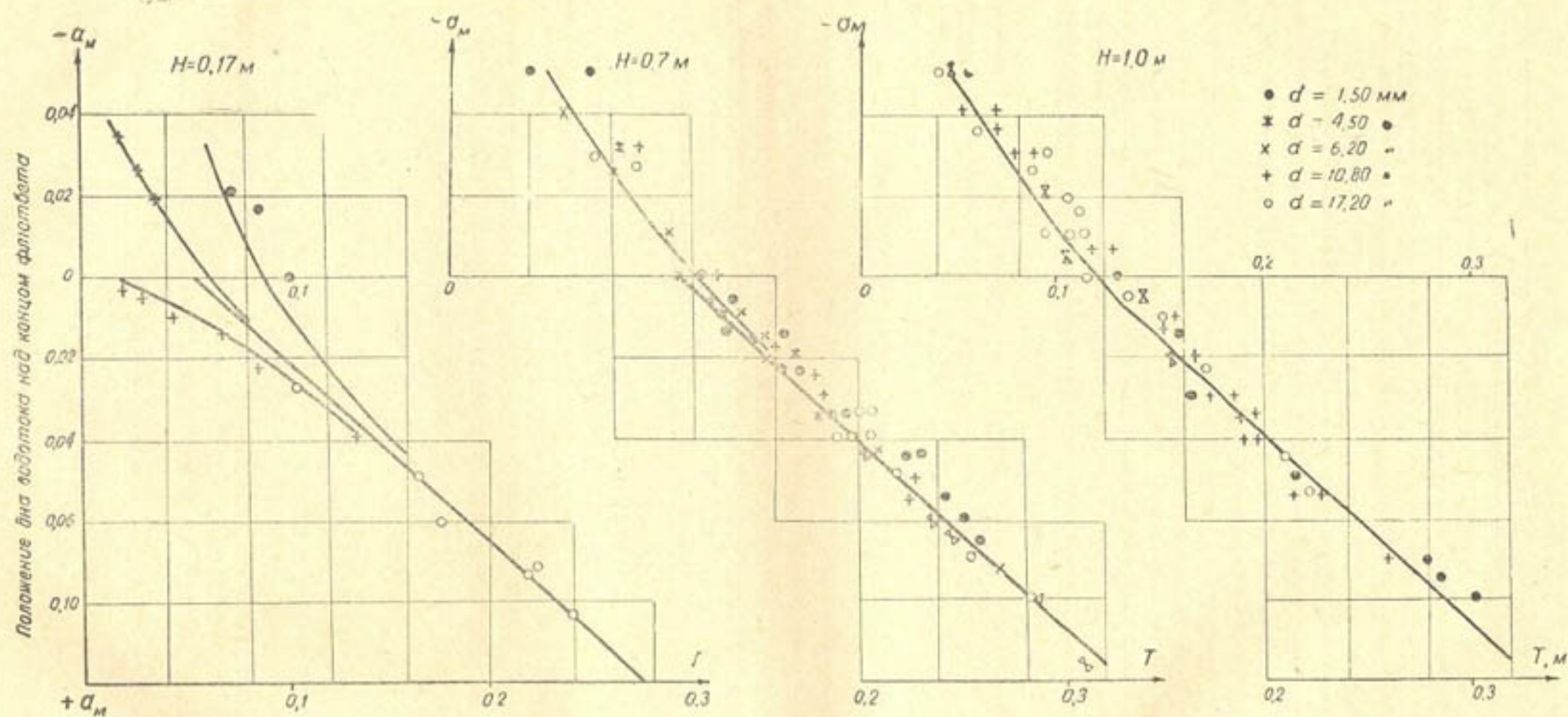


Рис. 5. Наибольшая глубина размыва при $q = 0,056 \text{ м}^3/\text{сек}$. Линия 0—0 на отметке дна крепления. Длительность пропуска воды в опыте равна 1 часу:

1 — $d = 1,50 \text{ мм}$; 2 — $d = 4,50 \text{ мм}$; 3 — $d = 6,20 \text{ мм}$; 4 — $d = 10,80 \text{ мм}$; 5 — $d = 17,20 \text{ мм}$.

что значительно ограничивает практическое использование формулы (2), так как она и без того относится только к условиям бурного сопряжения, что характерно для плотин лишь на горных и предгорных участках рек. Для сооружений в низовьях рек и в равнинных условиях, а также для большинства сооружений на оросительных каналах при обязательном обеспечении спокойного режима сопряжения (при затопленном прыжке в пределах водобоя) использование формул (1) и (2) исключено. Они могут быть использованы для расчета сооружений с глубоким заложением фундамента (низового зуба) с гидравлической схемой, изображенной на рис. 1. Достоинство этих формул в том, что они позволяют рассчитать изменение глубины T при различных отметках дна отводящего русла, зависящих от общих деформаций, вызванных задержанием (отложением) наносов перед сооружением (в верхнем бьефе, в водохранилище). Лабораторные исследования по выявлению влияния на размыв крупности зерен песка, выполненные А. Шокlichem, характеризуют графики для глубины и длины размыва (рис. 5 и 6). Наибольшая длина вымоины получается при наличии волн на поверхности нижнего бьефа без поверхностного водоворота (вальца). А. Шоклич отмечает это, хотя и не приводит ни формы, ни отметок свободной поверхности водотока. Он указывает, что действенной мерой, уменьшающей глубину размыва, может быть устройство зубчатых порогов и считает особенно желательным заглубление горизонтального водобоя до отметки, возможной в процессе общего размыва русла¹.

А. Шоклич утверждает также, что устройство за креплением каменной наброски для эффективной защиты от размыва должно быть достаточной длины и из нескольких слоев камня. В противном случае она бесполезна. При сбросе воды из уже занесенного водохранилища наносы проносятся в нижний бьеф и уменьшают размыв². Наибольшие размывы наблюдаются при спаде паводка. А. Шоклич особо отмечает, что с течением времени размыв скального грунта столь же велик, как и сыпучего (несвязного), хотя фактор времени для них имеет различное значение (количественные оценки А. Шокlichem не даны).

А. Шоклич интуитивно шел по пути исключения влияния сравнительно малых размеров (напоров) на моделях, что видно из отбрасывания им верхней левой части опытных кривых рис. 5. Свойства грунта в явной форме в его формулах не оцениваются.

Исследования в гидротехнической лаборатории САНИИРИ по размыву различных материалов (пески различной крупности, паровозная изгарь, зола рисовой лузги, древесные опилки, суглинки и др.), а в других лабораториях (Ленинградский политехнический институт,

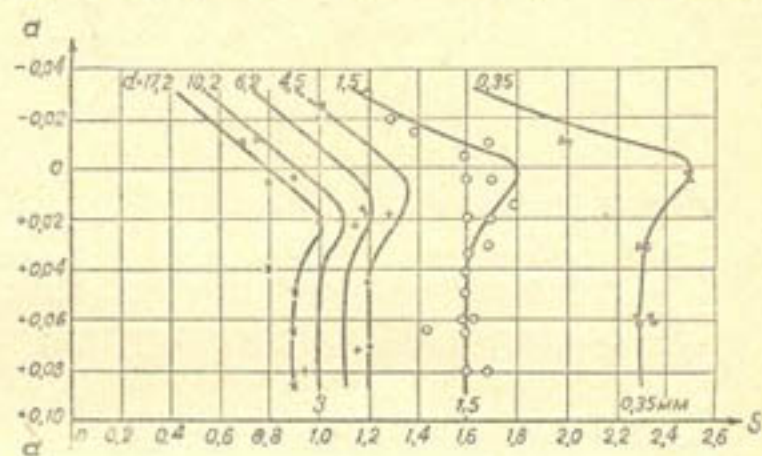


Рис. 6. Длина вымоины S при расходе $q = 0,056$ м³/сек. $L = 1,5H$; $H = 0,28$ м; d от 0,35 до 17,2 мм.

¹ См. [3].

² См. [1].

ВНИИГ, ВОДГЕО, Таллинский политехнический институт и др.)—отдельностей скалы, гравия, песка, древесных опилок пластмассовых и хлорвиниловых порошков, пек-торфа и других приводят к выводу о необходимости введения в расчетные формулы свойств грунта в более конкретной форме. В этом отношении заслуживает внимания предложение Н. Н. Суровой учитывать свойства размываемого несвязного материала по комплексной характеристике M . Для условий размыва бурным потоком [25, 26], вытекающим из под-плоского затвора под напором H и сходящим с короткого горизонтального крепления $l_{кр} < l_{пр}$, Сурова получила формулу

$$t = 0,55 M \sqrt{H} \sqrt[5]{\alpha_0 q V_{кк}}, \quad (4)$$

где

$$M = \sqrt[5]{\frac{P}{(\delta-1) \bar{w} \sqrt{\bar{d}}}}, \quad (5)$$

P — пористость материала;

δ — его удельный вес;

$\bar{w}$ — среднегидравлическая крупность;

$\bar{d}$ — средний диаметр зерен грунта;

$V_{кк}$ — средняя скорость в конце крепления;

$l_{кр}$ — длина гладкого крепления;

$l_{пр}$ — длина водоворотной зоны прыжка;

α_0 — корректив количества движения потока.

Характеристика M для однородных песков естественного удельного веса (просеянные речные пески) после использования данных А. А. Саркисян [22] о величине гидравлической крупности при обычной температуре воды (15°) получает вид

$$M = e^{\frac{4}{3 \sqrt[5]{\bar{d}}}}, \quad (6)$$

где e — основание неперовых логарифмов;

$\bar{d}$ — диаметр зерна, мм.

Для условий размыва спокойным потоком на основе опытов И. И. Леви (Ленинградский политехнический институт), Н. Н. Суровой и А. А. Кадырова (Институт водных проблем и гидротехники АН УзССР), К. А. Сулейменова (Институт энергетики АН КазССР), Л. Л. Пааль (Таллинский политехнический институт), П. К. Цветкова (Институт гидрологии и гидротехники АН УССР), а также опытов Д. И. Кумина по изучению в условиях неразмываемого русла коррективов α_0 и α (Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники в Ленинграде) появилась возможность получить для условий двухмерной (плоской) задачи формулу

$$t = K \cdot \frac{q}{V_{доп}}, \quad (7)$$

где $K = \sqrt[4]{\alpha_t}$ — коэффициент глубины размыва;

$\alpha_t = f(\eta, \lambda, n, \tau, M)$ — корректив неравномерности распределения и пульсации живой силы потока для сечения с глубиной t ;

$\eta = \frac{h_c^*}{h_c}$ — относительная высота прыжка;

$\lambda = \frac{l_{кр}}{h_c}$ — относительная длина крепления;

$n = f(\varepsilon, h_2)$ — коэффициент шероховатости крепления;

ε — абсолютная шероховатость этого крепления;

$\tau = \frac{h_2}{h_c^*}$ — степень затопления прыжка;

$V_{доп}$ — допускаемая (неразмывающая) скорость равномерного движения при заданном погонном расходе q .

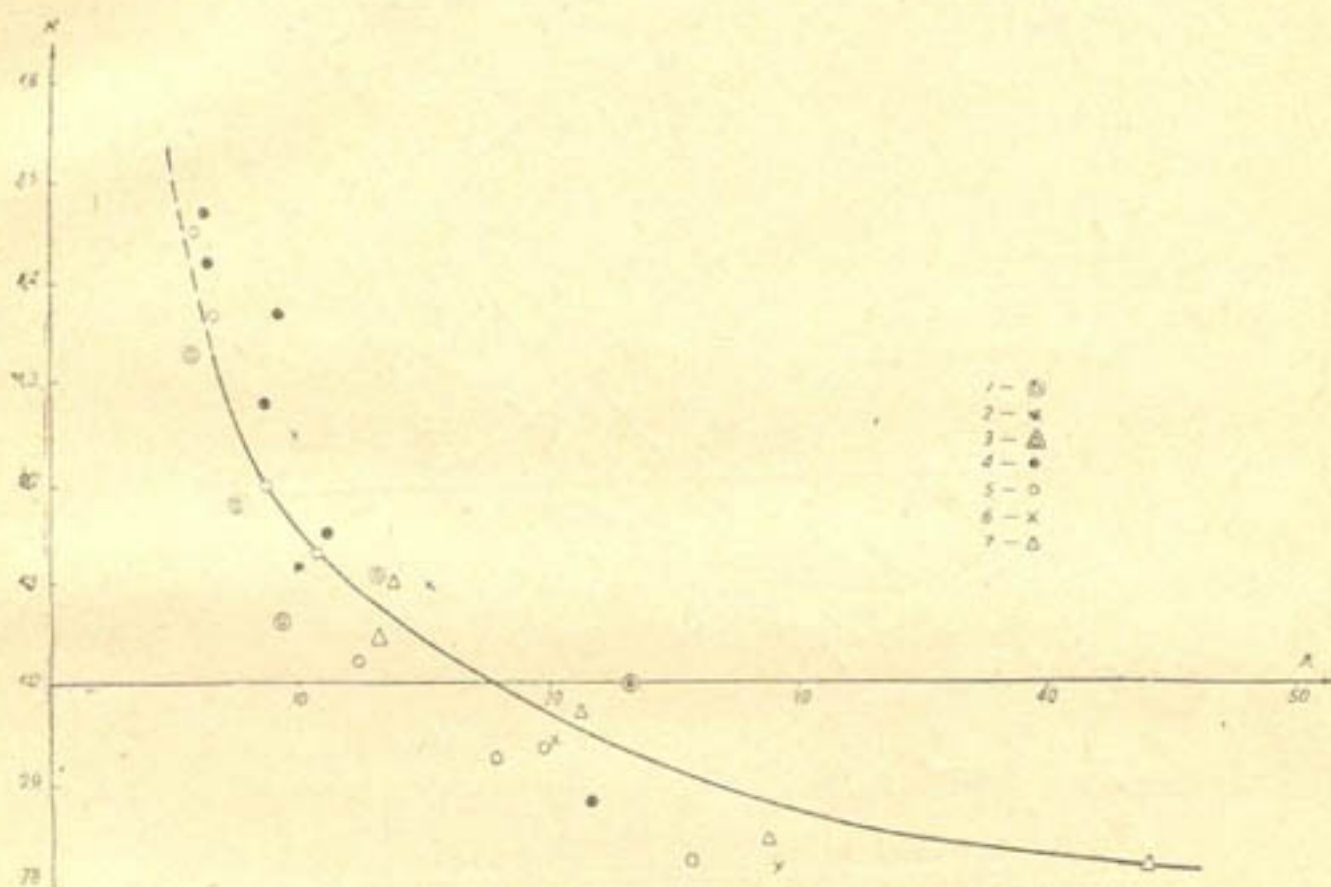


Рис. 7. Опыты по местному размыву за горизонтальным креплением при $\tau_{кр} = 4,3$. Значения K приведены к условиям мелкого песка и шероховатости стального дна. Условные обозначения:

1 — мелкий песок ($d_{ср} = 0,37$ мм), стеклянное дно, $n_{кр} = 0,009$; 2 — мелкий песок, шероховатое дно, $n_{кр} = 0,0166$; 3 — мелкий песок, шероховатое дно, $n_{кр} = 0,0216$; 4 — крупный песок ($d_{ср} = 1,5$ мм), стальное дно, $n_{кр} = 0,0104$; 5 — крупный песок, стеклянное дно, $n_{кр} = 0,009$; 6 — крупный песок, шероховатое дно, $n_{кр} = 0,0166$; 7 — крупный песок, шероховатое дно, $n_{кр} = 0,0216$.

В случае незатопленного гидравлического прыжка с надвинутым на сжатое сечение в пределах водобоя прыжком (когда $h_2 = h_c^*$) получено группирование опытных точек вокруг одной кривой для каждой величины η . Для $\eta = 4,3$ такая кривая изображена на рис. 7, где опытные точки отвечают исследованиям К. А. Сулейменова по размыву песков двух крупностей $d_1 = 0,37$ мм и $d = 1,5$ мм¹.

Величина K_1 для мелкого песка непосредственно читается на шкале ординат (K), а для получения K_2 (для крупного песка) надо

¹ О влиянии шероховатости крепления, учтенном при построении рис. 7, см. в [24].

пользоваться эмпирической зависимостью

$$\frac{K_2}{K_1} = f\left(\frac{M_2}{M_1}\right) = \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^{\frac{2}{3}} \approx \sqrt[3]{\frac{M_1}{M_2}}. \quad (8)$$

Влияние степени затопления τ прыжка на величину α показано на рис. 8, где на оси абсцисс даны значения τ , а на оси ординат $\frac{\alpha_z}{\alpha}$, т. е. отношение корректива α_z при $\tau > 1$ к α для случая незатопленного прыжка ($\tau = 1$).

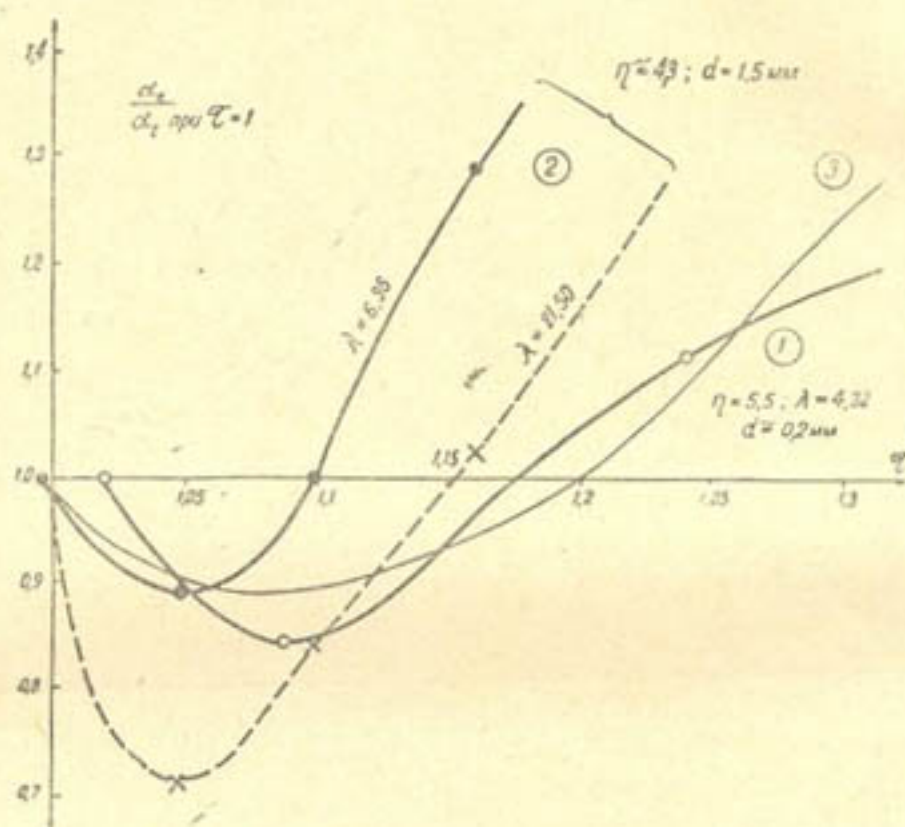


Рис. 8. Влияние степени затопления гидравлического прыжка (τ) на корректив α_z в условиях размываемого русла:

1 — опыты П. К. Цветкова; 2 — опыты К. А. Сулейменова; 3 — опытные данные Д. И. Кумина для сечения конца водоворотной зоны прыжка ($\lambda \approx 6$) в неразмываемом русле (осреднено для различных η от 4 до 10,45).

В этих формулах не учитывается влияние пространственности, чему уделили внимание в своих исследованиях Н. П. Зрелов, А. М. Латышенков, А. С. Образовский, И. И. Тараймович и Б. И. Студеничников (Труды ВОДГЕО), И. А. Шеренков [31], И. И. Леви [13], К. И. Россинский [21], Д. И. Кумин [11] и др.

Проблема улучшения конструкций и уменьшения размыва рассмотрена во многих опубликованных работах. Так, Е. В. Еременко [10] предложена специальная конструкция криволинейного зубчатого порога для уменьшения размывов за трубчатым водовыпуском, К. А. Адыловым [2] — устройство столбика-пирса. Некоторые другие конструкции описаны Н. Ф. Тушмановым [28] и в брошюре „Защита оросительных сооружений от размыва“ [7]. В статьях чехословацкого журн. „Vodohospodársky Časopis“, издаваемого Словенской академией

наук в Братиславе, также рассматриваются эти вопросы. В № 2 этого журнала за 1956 г. проф. Я. Чабелка в статье „Потери механической энергии на высоконапорных плотинах“ описывает ряд рациональных конструкций для разделения потока на струи и в их числе гребенчатые трамплины (такие конструкции с 1933 г. широко используются в Узбекистане). Некоторые вопросы расчета возможных размывов в пространственных условиях освещены в работе Ли Бао-жу [14]. В отличие от А. Шоклича, авторами перечисленных работ не рассмотрено влияние гидрографа¹. В новой немецкой гидротехнической литературе по местным размывам вообще, а в работе А. Шоклича в частности уделяется мало внимания теории растекания струй и оценке грунтов по их комплексным характеристикам. Крупность зерен песка оценивается по „действующему“ диаметру $d_{90\%}$ (рекомендовано А. Шокlichem и

А. Н. Патрашевым [30]) и по соотношению $\frac{d_{50\%}}{d_{90\%}}$, исходя из $m = \frac{\sum_0^{50\%} d \Delta P}{\sum_0^{100\%} d \Delta P}$ (определяются по кривым гранулометрического состава).

Мало внимания уделяется также и структуре турбулентного потока в зоне размыва. Эмпирические зависимости и коэффициенты получаются лишь на основе лабораторных опытов.

В Австрии, в журн. „Österreichische Wasserwirtschaft“ № 1 за 1960 год доц. П. Франке (P. G. Franke) в статье „Über Kolkbildung und Kolkformen“

для схемы а рис. 9 приводит эмпирическую формулу

$$t = K \left(\frac{5s}{L} \right)^{0.6} \frac{q^{0.6} z^{0.5}}{d_{90\%}^{0.4}}, \quad (9)$$

а для схемы б формулу

$$t = K \frac{q^{0.6} z^{0.5}}{d_{90\%}^{0.4}}. \quad (10)$$

Значения коэффициента K приведены в табл. 3.

Для условий схемы б приводится также формула

$$t = K h_{\text{крит}} \sqrt{\frac{z}{d}}, \quad (11)$$

где $h_{\text{крит}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$ — критическая глубина, а значения коэффициента K даются на рис. 9 и в табл. 4.

Никаких данных об эксплуатации и измерениях в натуре в статье П. Франке не приведено; не рассматриваются также условия пространственной задачи и конструкции для ослабления размывов.

Длина воронки размыва в условиях плоской (двухмерной) задачи определяется эмпирическими соотношениями, причем отмечается, что

¹ Влияние гидрографа на форму поперечного сечения русла рассматривается Г. К. Синявским [23].

Таблица 3

$\frac{q_1}{q_2}$	K		Исследователь
	$d_{90\%}, \text{ мм}$	$d_{90\%}, \text{ м}$	
∞	22,88	1,44	Эггенбергер
4	20,34	1,28	
3	18,48	1,17	
2	15,55	0,95	
1	11,98	0,76	
0	10,35	0,65	Мюллер Шалаш
0	9,65	0,61	

в условиях осреднения лабораторных данных по изучению размыва падающей струей (перелив) получено

$$l_1 \approx 0,5t, \quad l_2 = 1,8t \text{ и } \theta^\circ \approx 30^\circ,$$

в условиях истечения из под щита

$$l_1 \approx 3t, \quad l_2 = 6t \text{ и } \theta^\circ \approx 20^\circ$$

и что при одинаковых q , h , d наблюдается

$$\frac{t_{\text{ист}}}{t_{\text{пад}}} = \frac{K_{\text{ист}}}{K_{\text{пад}}} \approx 0,45,$$

а потому

$$l_{1 \text{ ист}} \approx 2,7 l_{1 \text{ пад}} \text{ и } l_{2 \text{ ист}} \approx 1,5 l_{2 \text{ пад}}.$$

Результаты исследований Лера (1927) не привлечены.

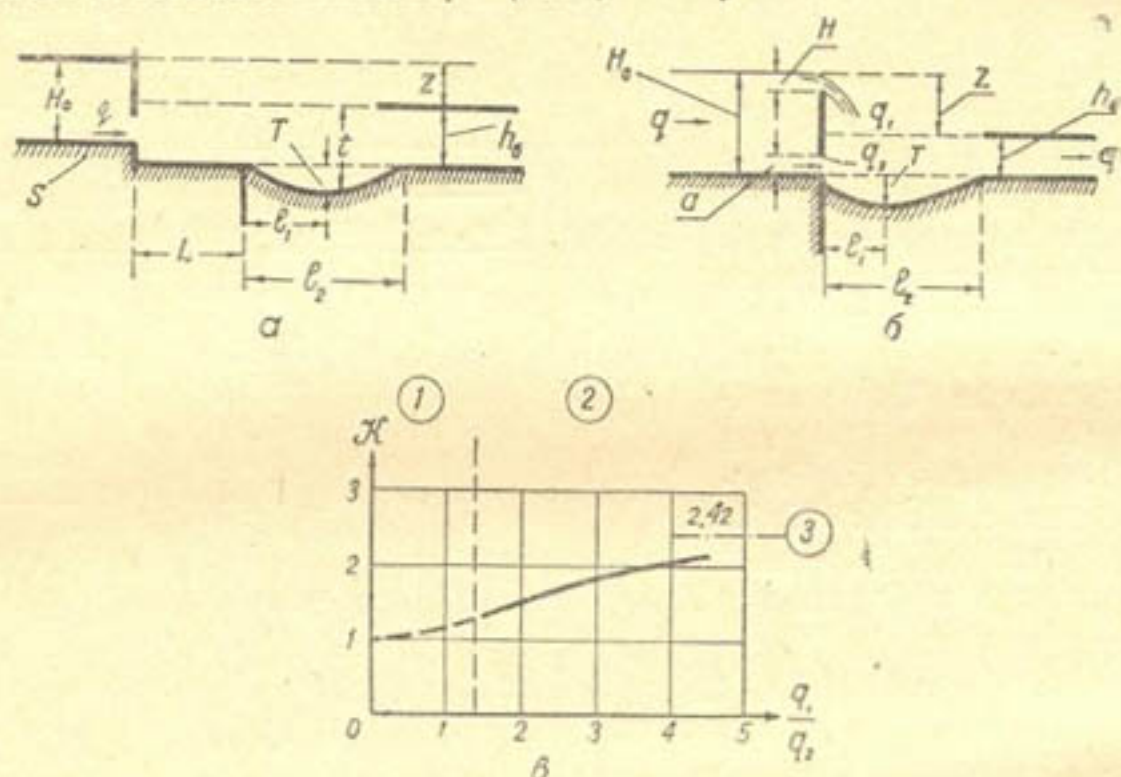


Рис. 9. Схемы сооружений (а и б) и график (в) для определения коэффициента размыва. Коэффициент $K = f\left(\frac{q_1}{q_2}\right)$:

1 — обратные течения; 2 — прямые течения; 3 — максимальное значение

K при $\frac{q_1}{q_2} = \infty$.

Вопрос о влиянии угла наклона падающей струи, а тем более ее пульсации, смены режимов (поверхностного и донного) в статье П. Франке также не рассматривается, хотя в литературе на немецком языке на это обращал внимание Эйнвахтер (1930). В своей статье П. Франке упоминает статьи Шоклича (1932), Крамера (1932), Веронезе (1937), Эгера (1939), Эггенбергера (1943, 1944), Мюллера (1944), Шалаша (1959), Хортунга (1957), книгу Эгера „Техническая гидравлика“, изданную в Базеле (1949) и в Лондоне — Глазго (1956 г.), а также свою статью „Theoretische Betrachtungen zur Stralkontraktion beim Ausfluss unter Schützen“ в журн. „Die Bautechnik“, 33, Heft 3, 1956. О работах советских исследователей П. Франке не упоминает.

Не уделяет внимания теории растекания струи и Ли Бао-жу,

который в работе [14] широко использует советскую литературу. Он обобщает результаты исследований многих эксплуатируемых сооружений Китая, рассматривает размывы у опор, на изгибе потока, в сужениях между дамбами и перемычками, перед понуром и за горизонтальным креплением сооружения при наличии гасителей энергии.

Таблица 4

Условие	$d_{90\%}, \text{мм}$	$\frac{d_{50\%}}{d_{90\%}}$	m	K	Исследователь
Истечение $q_1 = 0;$ $q_1 : q_2 = 0$	1,27	0,60	0,45	1,043	Мюллер
	1,40	0,64	—	1,028	
	2,70	0,70	0,43	1,051	
	5,40	0,68	0,40	1,071	
Истечение и перелив	0,73	0,712	0,50	0,873	Шалам
	1,87	0,882	0,44	0,910	
	2,65	0,823	0,40	0,909	
Истечение и перелив $q_1 : q_2 = 1;$ $q_1 : q_2 = 2;$ $q_1 : q_2 = 3;$ $q_1 : q_2 = 4;$	0,35	0,871	0,55	1,186	Эггенбергер
	0,35	0,871	0,55	1,546	
	0,35	0,871	0,55	1,817	
	0,35	0,871	0,55	2,045	
Перелив (падение) $q_2 = 0;$ $q_1 : q_2 = \infty$	0,12	0,738	0,52	2,193	Эггенбергер
	0,35	0,861	0,52	2,374	
	0,75	0,871	0,55	2,532	

Для определения глубины местного размыва песка и гравия за горизонтальным креплением он рекомендует формулу

$$t = K \frac{q}{V_{\text{доп}}} = \varphi \sqrt{2\alpha - \frac{y}{h}} \cdot \frac{q}{V_{\text{доп}}} = \frac{0,66 q \sqrt{2\alpha - \frac{y}{h}}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho} - 1\right) g d \left(\frac{h}{d}\right)^{\frac{1}{6}}}}. \quad (12)$$

В этой формуле

K и φ — расчетные коэффициенты;

α — корректив живой силы потока;

d — средний диаметр зерен несвязного грунта;

h — глубина в конце крепления;

y — положение максимальной скорости, зависящее от режима потока за гасителями энергии.

При удельном весе зерен песка $\delta = 2,65$ формула показана в виде

$$t = 0,164 \sqrt{2\alpha - \frac{y}{h}} \cdot \frac{q}{\sqrt{d^3 \sqrt{\frac{h}{d}}}}. \quad (13)$$

О необходимой длине крепления и конструкциях гасителей энергии Ли Бао-жу конкретных предложений не делает. Прогрессивным является учет корректива α .

Для условий размыва скальных пород падающей струей ни А. Шоклич, ни П. Франке, ни Ли Бао-жу конкретных рекомендаций не приводят.

На основе лабораторных исследований в Ленинграде ВНИИГ рекомендует [4] новые формулы расчета глубины размыва струей, ниспадающей с водоотбросного носка плотины:

для обломочных пород окатанной формы

$$t = K \sqrt{q \sqrt{z}} = \left(0,11 + 0,49 \sqrt[4]{F} \right) \sqrt[4]{\frac{h_0}{gd}} \cdot \sqrt{q \sqrt{z}}, \quad (14)$$

для трещиноватой скалы (из скальных отдельностей)

$$t = h_0 + 3,7 h_0 \varepsilon \left\{ \left(\varphi^2 \frac{T_0}{d} \right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{F^{0,4}} \left[\frac{\varphi^2 z_0}{h_0} - (1 - \varphi^2) \right]^{\frac{4}{9}} \right\}, \quad (15)$$

$$l = \frac{h_0}{\sqrt{F}} \left\{ 3 + 3,6 \lambda \left(\varphi^2 \frac{T_0}{d} \right)^{\frac{1}{6}} \left[\varphi^2 \frac{z_0}{h_0} - (1 - \varphi^2) \right] \right\}, \quad (16)$$

где d — диаметр шара, имеющего тот же объем, что и рассматриваемая скальная отдельность;

F — число Фруда на носке плотины;

ε и λ — коэффициенты, учитывающие влияние угла падения струи в воду, характер расположения слоев скалы, форму отдельностей и т. д.;

φ — коэффициент скорости;

T_0 — напор верхнего бьефа над дном нижнего бьефа.

В наших работах для расчета вероятной глубины размыва скального грунта чистой водой рекомендуется формула

$$t = AK \sqrt{\sigma q \sqrt{z_0}}, \quad (17)$$

где A — коэффициент аэрации;

K — коэффициент глубины, который учитывает и условия истирания (котел);

σ — коэффициент сбойности.

Величины коэффициентов проверены на эксплуатируемых объектах (Фархадская плотина и др.) и приведены в наших статьях в „Изв. АН УзССР“, 1947, № 6 и в „Изв. АН УзССР“, 1952, № 6.

На образование размывов влияют и условия зимнего режима, как это известно, например, из опыта эксплуатации Кзыл-Ординской плотины на р. Сыр-Дарье. Имеют значение и другие факторы. На рис. 10 приведен случай повреждения плотины на р. Bara (Váhy), описанный в статье В. Колара (V. Kolar) в журн. „Vodohospodársky Časopis“, 1959, № 4.

На международном конгрессе в Лиссабоне в 1957 г. в докладе И. Гандольфо и Р. Котта (Gandolfo J. S. and Cotta R.D.) „Гашение кинетической энергии на водобое щитовых плотин“ („Kinetic Energy Dissipation on Apron for Gate“) приведены результаты разработки конструкции ковшового водобойного колодца криволиней-

ного профиля с касательной на выходе под углом 45° к горизонту и исследований размывов за ним. Отмечается, что эта конструкция по размерам ($L < 2H$) экономичнее других, что она не подвержена повреждению от кавитации. Размывы изучались в песках, в состав

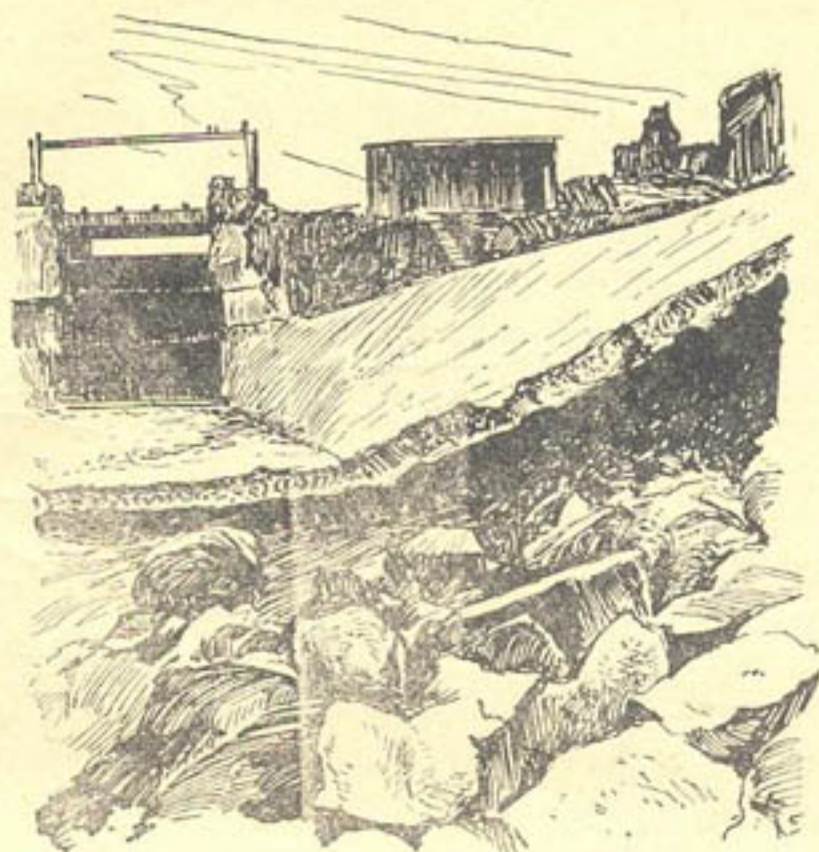


Рис. 10. Разрушение за плотиной после паводка на р. Вага.

которых входили частицы от $d = 0,246$ до $d = 9,525$ мм. Два испытания песка с разными диаметрами зерен в указанных границах дали почти одинаковые размеры размыва. (Одновременно указывается, что при очень больших скоростях выхода из сооружения возможны исключительно сильные размывы ложа реки). Предполагается, что гидравлические условия на водобое не позволят проявиться истиранию дна наносами, транзитом проходящими из верхнего бьефа (опыт эксплуатации многих сооружений, в том числе в Средней Азии, заставляет с осторожностью относиться к этому предположению).

Схема рекомендуемой конструкции приведена на рис. 11. Длину колодца рекомендуется рассчитывать при максимальном расходе по формуле

$$L = \frac{3,65}{\sqrt{g}} \sqrt[3]{q \sqrt{z}}. \quad (16)$$

На расстоянии $\frac{L}{2}$ глубина колодца (ковша) равна

$$D = \frac{L^2}{16H}. \quad (17)$$

Точка P располагается на глубине $\frac{0,75L}{4H + L}$.

При рекомендуемом предельном соотношении $L = 2H$ видим, что

$$D \approx \frac{0,46}{\sqrt[6]{g}} \sqrt[3]{q} \sqrt{z}.$$

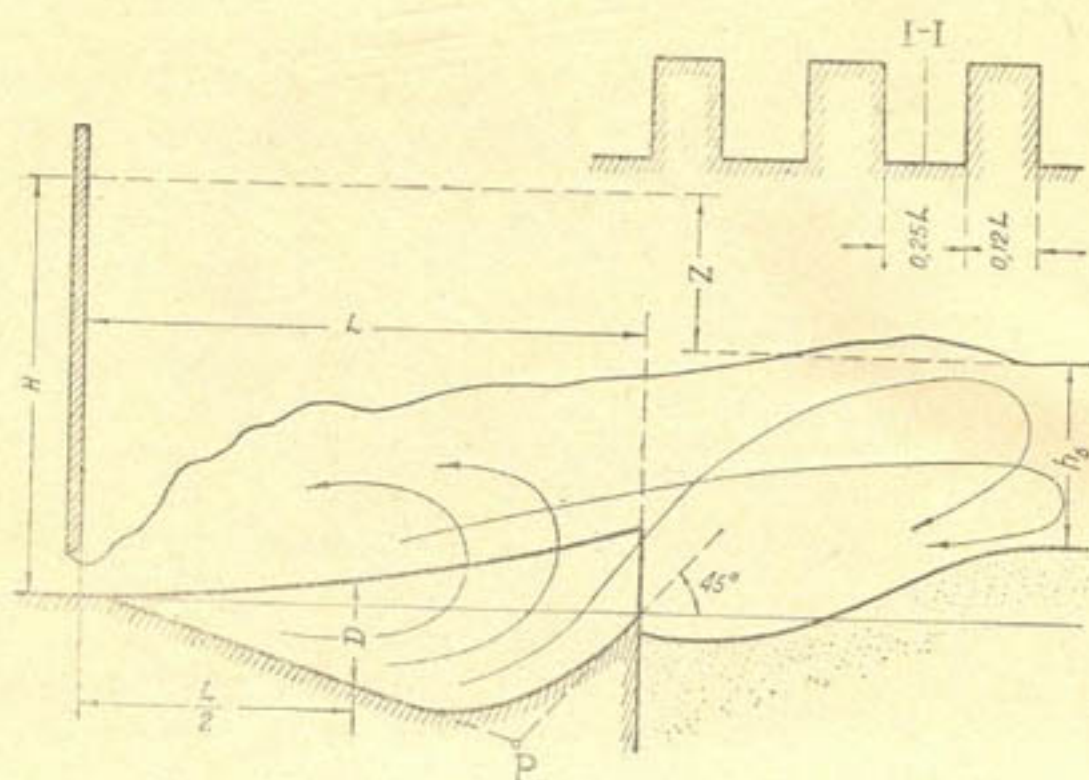


Рис. 11. Схема конструкции Гандольфо и Котта.

Другие размеры указаны на рис. 11. О фильтрации под сооружением и в обход сооружения эти докладчики, как и А. Шоклич, П. Франке и некоторые другие, в отличие от Бляя, ничего не сообщают. Перед практическим использованием своих рекомендаций авторы доклада советуют производить специальные гидравлические испытания.

Заканчивая реферат и замечания, отметим, что за последние 10 лет выполнено много полезных исследований по проблеме местных размывов за гидротехническими сооружениями. Однако некоторые вопросы требуют дальнейшего уточнения и изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдураунов Р. Р. Процесс занесения нижнего бьефа деривационных гидроузлов и его расчет, *Изв. АН УзССР**, сер. техн. наук, 1957, № 4.
2. Адылов К. А. Некоторые опыты по защите от местного размыва за сооружением трубчатой конструкции, *Изв. АН УзССР**, сер. техн. наук, 1959, № 6.
3. Алтуни С. Т. Исследование в натуре крупного гидроузла, *Труды Института сооружений АН УзССР*, 1958, № 8.
4. Аннотации законченных в 1958 г. научно-исследовательских работ по гидротехнике, М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
5. Беляшевский Н. Н. Розрахунок нижнього б'єфу за низконапірними водоскидними спорудами, обладнаними зливними полами, Киев, АН УССР 1959.
6. Близняк Е. В., Гришин М. М., Ахутин А. Н. и др. Курс гидротехнических сооружений, М., Стройиздат, 1938.
7. Вызго М. С., Машкович Л. А., Сурова Н. Н. Защита оросительных сооружений от размыва, Ташкент, Госиздат УзССР, 1950.
8. Гвелесиани Л. Г. Лабораторно-экспериментальные исследования сооружений головного узла Читахевской ГЭС на реке Куре. *Изв. Тбилисского научно-исследовательского института сооружений и гидротехники*, № 1, 1947.

9. Гордиенко П. И. Исследование земляных водосливных плотин, Сборник трудов МИСИ им. В. В. Куйбышева, М., 1959, № 29.
10. Еременко Е. В. Улучшение сопряжения бьефов и его расчет за подпорными однопролетными шлюзами на каналах трапециoidalной формы, Техническая информация, Киев, Укргипроводхоз, 1958.
11. Кумин Д. И. Основные вопросы проблемы сопряжения бьефов гидротехнических сооружений, Доклад на секции гидравлики конференции ВНИИГ, Л., 1957.
12. Латышенков А. М. Применение пирсов-растекателей на водобое плотин для ликвидации сбойных явлений в нижнем бьефе, Труды гидравлической лаборатории, вып. 3, ВОДГЕО, М., 1957.
13. Леви И. И. Движение речных потоков в нижних бьефах гидротехнических сооружений, М.—Л., Госэнергоиздат, 1955.
14. Ли Бао-жу. Синтетическое исследование местных размывов в нижних бьефах гидротехнических сооружений, Труды научно-исследовательского института гидротехники в г. Нанкине, 1959.
15. Образовский А. С. К учету увеличения удельных расходов за рисбермами водосливных плотин, Гидротехническое строительство*, 1957, № 12.
16. Осипов В. Б. Результаты модельных испытаний Кок-Суйского гидроузла. Информационный бюллетень Института Казгипроводэлектро Главводхоза при Совете Министров КазССР, Алма-Ата, 1959, № 1.
17. Пашков Н. Н. Расчет гасителей шашечного типа за трубчатыми водосбросами, Труды кафедры гидротехнических сооружений МИСИ, сб. № 24, вып. 1, М., 1958.
18. Пивовар Н. Г. Экспериментальное исследование гидравлического давления на бетонное крепление за водосливными плотинами с носками, Изв. Института гидрологии и гидротехники АН УССР, т. 12, 1955.
19. Розанов Н. П. Вопросы проектирования водопропускных сооружений, работающих в условиях вакуума и при больших скоростях потока, Госэнергоиздат, М.—Л., 1959.
20. Розовский И. Л., Беяшевский Н. Н. и Цветков П. К. Гидравлические исследования водосливной плотины и нижнего бьефа Каховской ГЭС, Изв. Института гидрологии и гидротехники АН УССР, т. 12, 1955.
21. Россинский К. И. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений, Сборник «Проблемы регулирования речного стока», вып. 6, М., АН СССР, 1956.
22. Саркисян А. А. Осаждение наносов в турбулентном потоке, Сборник «Русловые процессы», М., АН СССР, 1958.
23. Синяевский Г. К. Исследование формы поперечного сечения русла, Изв. АН КазССР*, сер. энергетическая, вып. 2/16, 1960.
24. Сулейменов К. А. К вопросу о гидравлическом расчете крепления в нижнем бьефе гидротехнических сооружений, Изв. АН КазССР*, сер. энергетическая, вып. 1/15, 1959.
25. Сурова Н. Н. Вопросы методики моделирования размывов русла (учет пористости размываемого материала), Сборник «Русловые процессы», М., АН СССР, 1958.
26. Сурова Н. Н. К вопросу о местном размыве за горизонтальным креплением нижнего бьефа, Гидротехническое строительство*, 1957, № 2.
27. Троицкий А. В. Замечания по статье чл.-корр. АН УзССР М. С. Вызго «Гидравлическая схема размыва за горизонтальным креплением и расчетная формула для глубины размыва», Изв. АН УзССР*, сер. техн. наук, 1957, № 3.
28. Тушманов Н. Ф. Водобой и рисберма головного регулятора канала имени Ахунбабаева, Гидротехническое строительство*, 1948, № 7.
29. Цветков П. К. Исследование поверхностного режима за донным порогом, установленным на водобое плотины, Изв. института гидрологии и гидротехники АН УССР, т. 12, 1955.
30. Чертоусов М. Д. Гидравлика, Специальный курс, М.—Л., Госэнергоиздат, 1957.
31. Шеренков И. Л. Растекание бурного потока за выходными оголовками водопропускных труб и малых мостов, Автореферат диссертации, Харьков, 1958.

А. ТЛЕУКАБЫЛОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ВЫВОДА РАСЧЕТНОЙ ФОРМУЛЫ ГЛУБИНЫ РАЗМЫВА В НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТАХ

УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ СОСТАВА ПЕСКА И УГЛА НАКЛОНА СТРУИ

Размыв несвязного грунта падающей струей представляет собой процесс, в котором размываемым объектом служит сыпучая среда, а разрушающим — жидкая.

Наши представления о разрушении размываемого материала жидкой струей и ее энергетике в воронке размыва дают лишь первое приближение к действительности. Это не позволяет пока получить сколько-нибудь законченную теоретическую картину явления и заставляет ограничиться приближенной его характеристикой. Неполнота наших знаний и сложность явлений, происходящих в воронке размыва, побуждают рассматривать процесс размыва по упрощенной схеме и определять главным образом глубину размыва ($t = T + h$). В этих условиях, естественно, не исключается недоучет влияния тех или иных факторов на величину t . Почти во всех рекомендуемых формулах не учитываются в явном виде влияния глубины потока в нижнем бьефе h и коэффициент неоднородности размываемого материала $n = \frac{d_k}{d_c} = \frac{d_{90}}{d_{50}}$ на глубину размыва t .

С целью выяснения влияния величин n и h на глубину размыва нами в 1958—1959 гг. в Казахском государственном педагогическом институте им. Абая проводились специальные опыты на плоском лотке размерами $3,0 \times 0,39 \times 1,0$ м с прозрачными стенками на длине 1,25 м (органическое стекло).

Размываемый материал (речной песок) подбирался по рекомендации Н. Н. Суровой таким образом, что при постоянном диаметре d_c менялся диаметр d_k (d_c и d_k — подбирается из кривой гранулометрического состава песка).

Опыты показали, что распределение твердых частиц в воронке размыва зависит в основном от гранулометрического состава размываемого материала. В связи с этим можно различать воронки размыва с более или менее равномерным распределением твердых частиц (при $n \approx 1,0$) и неравномерным (при $n \gg 1,0$). В последнем случае в воронке размыва происходит осаждение более крупных частиц и образование на дне слоя отложений. Этот режим связан с большими удельными затратами энергии на перенос твердого материала (затратами энергии на перемещение единицы веса твердого материала).

С увеличением величины n неравномерность распределения твердых частиц увеличивается, трение частиц о дно возрастает, а от тормозящего действия дна увеличивается сопротивление. В результате

потеря энергии струи увеличивается, а следовательно, глубина размыва уменьшается.

Графиком $t = f(n)$, приведенным на рис. 1, хорошо соответствует (при постоянстве всех элементов потока) уравнение

$$t = \frac{C}{n^{0.15}} \quad (C = \text{const}). \quad (1)$$

Как показывает анализ наших опытов, а также специальные исследования в САНИИРИ, результаты которых частично освещены в

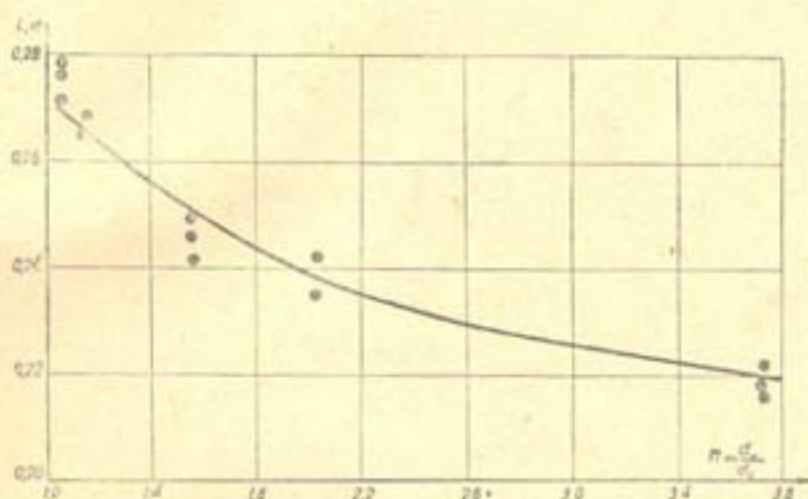


Рис. 1. График зависимости глубины размыва t от коэффициента неоднородности размываемого материала n .

Песок $d_c = 1,8$ мм; $\alpha = 81^\circ$;
 $q = 0,0108$ м²/сек; $Z_0 = 0,68$ м.

работе [4], величина h оказывает влияние на глубину размыва, причем с увеличением h величина t монотонно возрастает (пропорционально $h^{0.20}$).

Таким образом, в случае размыва несвязного грунта падающей струей глубиной размыва, кроме коэффициента аэрации A и угла входа струи в воронку размыва (α), зависит от характеристики потока $f(q, Z_0, h)$ и свойств размываемого материала $g \cdot \bar{K}_m$.

Если мы пренебрежем влиянием второстепенных факторов, то будем иметь дело с пятью размерными величинами q, Z_0, h, g и M (q — удельный расход воды, м/сек; Z_0 — полный напор, м; $g = 9,81$ м/сек²).

Предположим, что в некотором определенном случае глубина размыва может быть представлена как произведение степеней в форме

$$t = AK_\alpha \bar{K}_m q^{\beta_1} Z_0^{\beta_2} h^{\beta_3} g^{\beta_4}, \quad (2)$$

где K_α — коэффициент размыва, зависящий только от угла α ,

$\bar{K}_m$ — комплексная характеристика материала.

Примем $\bar{K}_m$ с учетом (1) в виде

$$\bar{K}_m = \frac{M}{n^{0.15}}, \quad (3)$$

где $M = \sqrt[5]{\frac{\gamma_n p}{(b-1) d_c^{0.5} \omega}}$ — характеристика размываемого материала, принятая по рекомендации Н. Н. Суровой [1].

Возникает вопрос, каковы должны быть показатели степеней $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ и β_4 , чтобы t имело надлежащую размерность?

Приравнявая показатели степени при величинах L и T (L — длина, T — время), в обеих частях равенства (2) получим

$$t = AK_\alpha \bar{K}_m q^{0.50} Z_0^{0.25} \cdot h^{0.20}, \quad (4)$$

где

$$K_m = \frac{M}{n^{0,15} g^{0,15}} \quad (5)$$

Нами сделана попытка вывести закономерность $K_\alpha = f(\alpha)$. Если глубина размыва (при постоянстве всех элементов потока и размываемого грунта) не зависела бы от угла α , то для всех $\alpha \geq 0^\circ$ выполнялось бы равенство

$$K_\alpha = f(\alpha) = \text{const.}$$

Опыты показали, что угол α (в наших опытах $\alpha = 23^\circ \div 85^\circ$) существенно влияет на величину t , причем с увеличением угла α глубина размыва увеличивается. Кроме того, это увеличение менее заметно с увеличением диаметра размываемого материала.

В результате обработки 116 опытов, выполненных нами, а также анализа литературных данных [1—12] мы получили следующие зависимости для K_α :

$$K_\alpha = \frac{1,69}{1 - 0,304 \operatorname{tg} \alpha} (\alpha < 15^\circ); \quad K_\alpha = \frac{7,08}{1 + 0,758 \operatorname{ctg} \alpha} (15^\circ < \alpha < 35^\circ);$$

$$K_\alpha = \frac{4,25}{1 + 0,167 \operatorname{ctg} \alpha} (\alpha > 35^\circ). \quad (6)$$

Коэффициент K_α в этой формуле при $\alpha = 0^\circ$ зависит от относительной длины крепления $\frac{l}{h}$, причем, как показывает предварительная обработка опытных данных И. И. Леви [5], Н. Н. Суровой [9] и К. И. Россинского [11], уменьшение $K = K_\alpha$ с увеличением $\frac{l}{h}$ происходит неодинаково: вначале быстро, а затем медленнее. Значение $\frac{l}{h} \approx 5,5$ соответствует $K_\alpha = 1,65$ ($\alpha = 0^\circ$).

В заключение приводим график зависимости $K_\alpha = f(\alpha)$ (рис. 2) по наиболее распространенным формулам разных авторов и напомним формулу Рэлея [7].

Формула Рэлея для определения силы давления в случае обтекания пластины шириной s жидкостью с плотностью ρ при скорости набегающего потока v имеет вид

$$p = \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha} \rho v_0^2 = K_p s \frac{\rho}{g} v_0^2,$$

где α — угол атаки¹,

$$K_p = g \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}.$$

Ниже для сравнения даются расчетные формулы некоторых авторов, приведенные к общему виду:

¹ О давлении на дно сосуда вертикально направленной струей см. также в книге В. В. Голубева "Теория крыла аэроплана в плоско-параллельном потоке", М.—Л., ГОНТИ НКТП, 1938 (Редколлегия).

Автор	Формула	Примечание
Е. А. Замарин [1]	$t = K_3 q \lg \left[\frac{v_0}{au_0} \right]^{\frac{1}{3}}$	$K_3 = 4,20 \sin \alpha$ $\alpha > 10^\circ$
М. С. Вызго [3]	$t = K_B A q^{0,50} Z_0^{0,25}$	$K_B = f(\alpha, M)$ $\alpha > 0^\circ$
М. А. Михалева [12]	$t = K_M \left[\frac{1,33q}{\sqrt{gd_k} \left(\frac{h}{d_k} \right)^{\frac{1}{3}}} - 2,12 b_0 \right]$	$K_M = \frac{4,25 \sin \alpha}{1 - 0,215 \operatorname{ctg} \alpha}$ $\alpha > 30^\circ$
Рэлей (Reyleigh, 1877)	$t = K_P s \frac{\rho}{g} v_0^2$	$K_P = g \frac{\pi \sin \alpha}{4 + \pi \sin \alpha}$ $\alpha > 0^\circ$

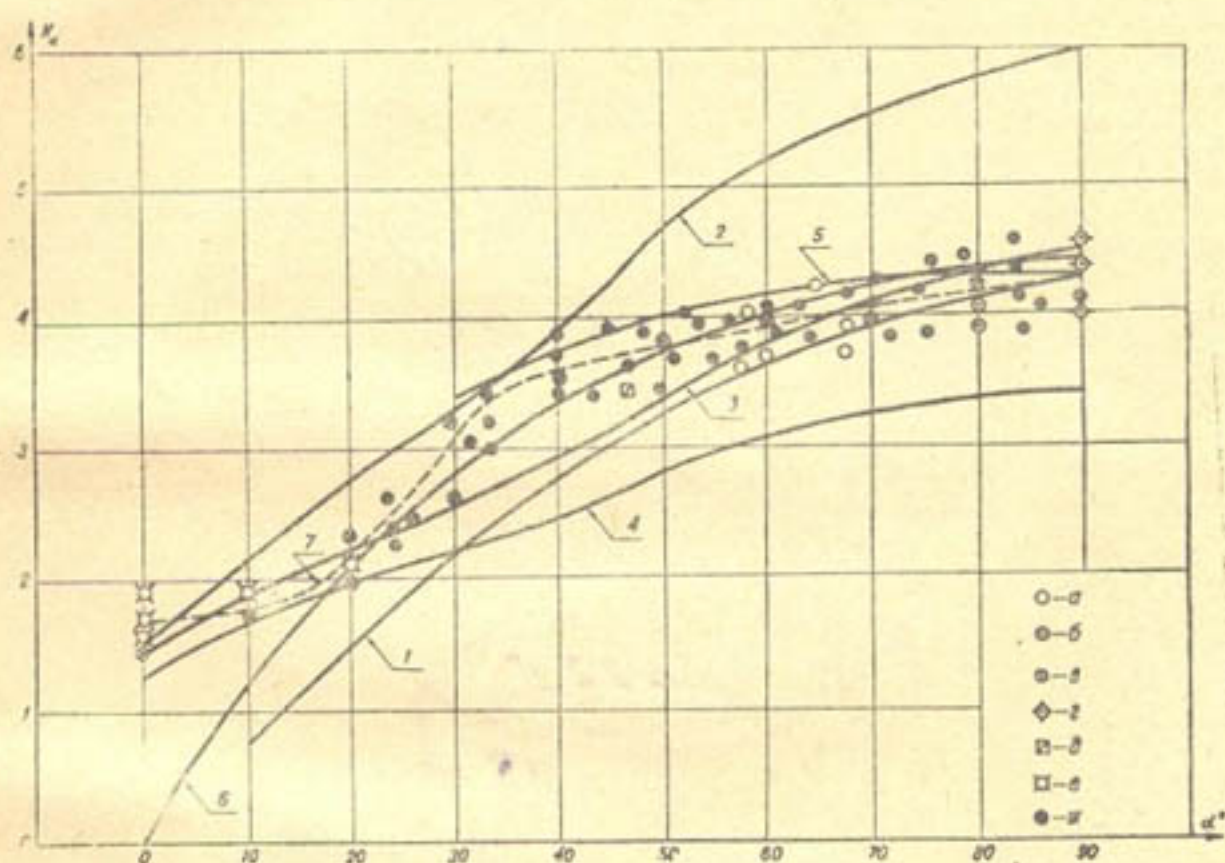


Рис. 2. Зависимость $k_a = f(\alpha)$ по формулам: Замарина (1), Вызго — для легко взмучиваемых, слабых и прочных грунтов (2, 3, 4), Михалева (5), Рэлей (6), автора (7).

Опытные точки: а — Шокича; б — Патрашева; в — Фроликовой; з — Вызго и Филиппова; д — Михалева; е — натурные; ж — автора.

На рис. 2 показаны результаты этого сопоставления в виде графиков связи $K_a = f(\alpha)$. Точками обозначены опытные и натурные данные в условиях использования формулы [4]. Как видно, наибольшее расхождение с формулой (6) составляет всего 10%.

ВЫВОДЫ

1. Коэффициент n неоднородности размываемого материала влияет на глубину размыва t , причем с увеличением n величина t уменьшается (пропорционально $n^{-0,15}$).

2. С увеличением глубины потока в нижнем бьефе h величина t монотонно возрастает (пропорционально $h^{0,20}$).

3. Свойства размываемого материала можно определить по формуле (5) для K_m .

4. Угол α входа струи в воронку размыва влияет на величину t , причем с увеличением угла α от 0 до 90° величина t увеличивается в 2,5 раза¹. Для расчета можно пользоваться формулой (6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Замарин Е. А., Попов К. В., Фандеев В. В. Гидротехнические сооружения, М., ГИСЛ, 1952.
2. Патрашев А. Н. Определение максимальной глубины размыва грунта, производимого ниспадающей струей, Изв. ВНИИГ*, 1937, т. 21.
3. Вызго М. С. О местном размыве за горизонтальным креплением и падающей струей, Гидротехническое строительство*, 1954, № 5.
4. Вызго М. С. и Филиппов Е. Г. Растекание струи и размыв несвязного грунта, Изв. АН УзССР*, 1956, № 5.
5. Леви И. И. Моделирование местных размывов русел в нижних бьефах гидросооружений, Изв. ВНИИГ*, 1952, т. 48.
6. Смольянинов Н. Т. Местный размыв русел в нижних бьефах плотин, Автореферат диссертации, Ташкент, 1953.
7. Чаплыгин С. А. Собрание сочинений, т. 2, М., 1948.
8. Фроланкова Е. Я. Поверхностный и донный режим сопряжения и размыв грунта наклонной струей, Гидротехническое строительство*, 1957, № 2.
9. Сурова Н. Н. Вопросы методики моделирования размывов русла, В сб.: Русловые процессы*, М., АН СССР, 1958.
10. Дадабаев К. Б. Мероприятия по защите нижнего бьефа от размыва, Гидротехническое строительство*, 1955, № 7.
11. Россинский К. И. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений, В сб.: Проблемы регулирования речного стока*, М., АН СССР, вып. 6, 1956.
12. Михалев М. А. Местный размыв русла за сооружениями при сопряжении бьефов по типу отброшенной струи, Научные доклады высшей школы* (серия строительства), 1958, № 3.

¹ Примерно такое же увеличение получено и немецкими исследователями (см. Реферат М. С. Вызго по статьям А. Шоклича и П. Франке* в данном сборнике. — Редколлегия).

СОДЕРЖАНИЕ

Член-корр. АН УзССР С. Т. Алтуни . Заиление водохранилищ на реках Китайской Народной Республики	5
Член-корр. АН УзССР С. Т. Алтуни . Борьба с наводнениями и засухой в Китайской Народной Республике	17
Ю. И. Горский, И. К. Николаев. Перспективы развития орошения в Чирчик—Ангрен—Келесском ирригационном районе	30
К. А. Авлянова. Автоматизация и телемеханизация оросительных каналов. С. Х. Абальянц. Расчет незаиляемых оросительных каналов и открытых пульповодов	33
В. С. Лапшиков. Некоторые результаты обработки данных по заилению и занесению подпертых бьефов гидроузлов, построенных на реках Узбекистана	38
В. Б. Гуссак. Опыт микрокиносъемки пограничного слоя потока с размываемым дном	58
М. П. Кузьминов. Деформация земляных плотин в зависимости от способов производства работ и темпа заполнения водохранилища	65
И. А. Шнейер. Формирование плотности песчаных отложений в водной среде. А. П. Любомудров. Гидротехнические мероприятия по обеспечению судоходства на Аральском море	85
Член-корр. АН УзССР М. С. Вызго. Растекание и пульсация наклонной струи в созданной ею воронке размыва и зависимость $K = f(\beta^0, x, \lambda)$	91
Т. Х. Ахмедов. Определение фокуса размыва при сопряжении бьефов свободно отброшенной с носка плотины струей	102
Член-корр. АН УзССР М. С. Вызго. Реферат и замечания по статьям А. Шокича и П. Франке	112
А. Тлеукабылов. Применение теории размерности для вывода расчетной формулы глубины размыва в несвязных грунтах	121
	125
	144