СРЕДНЕАЗИАТСКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИРРИГАЦИИ
„САНИИРИ"

Гидротехническая
лаборатория
Инж. И. Я. ОРЛОВ

Некоторые вопросы исследований русел рек при водозаборе

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

г. Ташкент
1952 год

За годы сталинских пятилеток развитие ирригации и гидротехники в нашей стране приняло гигантский размах. Построено и строится в возрастающем темпе большое количество гидротехнических узлов сооружений. Ускоренными темпами проводятся работы на Великих стройках коммунизма на Волге, Днепре и Аму-Дарье. Многочисленные производственные организации и научно-исследовательские учреждения накопили большой материал по вопросам проектирования, строительства и эксплуатации этих сооружений. Техника этого дела шагнула далеко вперед. Однако, наряду с крупными достижениями встречается еще и ряд серьезных затруднений при эксплуатации многих существующих водозаборных узлов. Исследования существующих сооружений показывают, что обычными являются: занесение верхнего бьефа наносами; размыв русла в нижнем бьефе; блуждание русла и деление потока на рукава при подходе к сооружению; подмыв дамб и других сооружений; занесение или размыв головных участков отводящих каналов, а в отдельных случаях отложение наносов в нижнем бьефе и подъем дна происходят вплоть до перекрытия всего узла толщей наносных отложений.

Указанные затруднения объясняются сложностью и недостаточной изученностью процессов формирования русел рек и отсутствием теоретически обоснованной и проверенной практикой методики проектирования и расчета водозаборных узлов сооружений и прилегающих к ним участков русла. Вследствие такого положения в практике гидротехнического строительства утвердилось правило, по которому ни одно более или менее крупное гидросооружение не строится без лабораторных исследований модели сооружения с прилегающим к нему участком русла в верхнем и нижнем бьефе. Несмотря на всю важность и ответственность лабораторных исследований, методика расчета моделей русел далеко не совершенна и нуждается в серьезной доработке.

В нашей работе сделана попытка восполнить имеющийся пробел в области моделирования русел при их регулировании для различных водохозяйственных целей. С этой целью автором в Гидротехнической лаборатории САНИИРИ были проведены теоретические, лабораторные и полевые исследования. При этом в работе были использованы многолетние данные полевых исследований САНИИРИ и Института сооружений АН Узбекской ССР.

1. Некоторые зависимости между элементами устойчивых русел

Между формой естественного аллювиального русла и структурой потока существует неразрывная связь, взаимозависимость. Русло управляет потоком и обратно—поток создает себе русло, соответствующее характеру его протекания.

Формирование русла у сооружения также подчиняется вполне определенным закономерностям.

Между шириной и глубиной естественного русла существует определенная нелинейная зависимость, т. е. отношение ширины реки к средней глубине $\frac{B}{H}$ не является величиной постоянной, она больше на больших реках, чем на малых и ручьях, а также увеличивается от верховья к устью реки.

Впервые в 1924 г. Государственным гидрологическим институтом на основании обработки гидрометрического материала по различным рекам СССР (преимущественно равнинного типа) была получена зависимость между шириной и средней глубиной рек следующего вида:

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = A \qquad (1)$$

где среднее значение $A = 2.74$, причем для песчаных русел величина его доходила до 5.5, а для скалистых горных падала до 1,4.

В результате обработки материалов исследований различных рек в бассейнах Верхней Волги и Оки, а также других равнинных рек СССР С. И. Рыбкиным получены следующие зависимости:

$$B = 4{,}67\, Q^{0,57}\, K^{0,13}\, J^{-0.07}$$

$$H = 0{,}069\, Q^{0,22}\, K^{0,5}\, J^{-0,24}$$

$$V = 3{,}10\, Q^{0,21}\, K^{0,37}\, J^{0,31} \qquad (2)$$

где B — средняя ширина по зеркалу воды в м,
H — средняя глубина в м,
Q — средний многолетний расход в м^3/сек,
J — уклон водной поверхности,
V — средняя скорость м/сек,
K — модульный коэфициент—отношение мгновенного расхода к среднему многолетнему.

На основании данных полевых исследований на реках Средней Азии, а также обработки гидрометрического материала главнейших рек Европейской части СССР С. Т. Алтуниным получена зависимость в виде:

$$B^m = KH \qquad (3)$$

где B — ширина зеркала воды на устойчивом участке в м,
H — средняя глубина при руслоформирующем расходе в м.
Под руслоформирующим расходом имеется в виду расход 2—10% обеспеченности; этот расход часто совпадает с наибольшим наблюденным повторяемостью один раз в 5—10 лет[1].
m — переменная величина, изменяется в пределах от 1 до 0,5, причем большее значение относится к горным, а меньшее к равнинным участкам рек,
K — коэфициент пропорциональности, равный 8—12.

Зависимость (3) имеет очень важное значение для моделирования русел в лаборатории.

2. Устойчивость речного русла

Степень устойчивости или подвижности речного русла определяется соотношением между силами движения воды и сопротивления ограничивающего поток размываемого ложа. Сравнивая указанные силы в виде их отношения, инж В. М. Лохтин (1897 г.) получил выражение

$$f = \frac{d}{h} \qquad (4)$$

где d — диаметр наносов, слагающих русло реки,
h — скоростной напор $\left(\frac{v^2}{2gl}\right)$, отнесенный к единице длины участка,
величина пропорциональная
т. е. уклону реки.

Отношение (4) Лохтин назвал коэфициентом устойчивости речного русла. Считая коэфициент Лохтина неточным, т. к. последний представляет собой размерную величину, проф. Великанов М. А. рекомендует в качестве измерителя степени устойчивости реки брать отношение диаметра наносов к скоростному напору в виде

$$\eta = \frac{gd}{v^2} \qquad (5)$$

М. А. Великанов считает выражение (5) числом безразмерным, аналогичным числу Фруда, в котором в качестве характерного линейного размера глубина воды заменяется диаметром наносов. Однако известно, что диаметр наносов пропорционален произведению глубины на уклон[2] $d = KHJ$. Следовательно, выражение (5) имеет размерность уклона (отношение вертикального размера к горизонтальному) элемен-

[1] Алтунин С. Т. Регулирование русел рек при водозаборе, М. Сельхозгиз, 1950 г.
[2] А. П. Зегжда. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей, 1938 г., Госстройиздат

та потока, величина которого связана не только с размывающей способностью потока, но и с размерами последнего.

Вместо выражений (4) и (5) в качестве критерия устойчивости или подвижности русла нами на основании проведенных исследований рекомендуется пользоваться безразмерным числом

$$\varphi = \frac{d(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma H J} \qquad (6)$$

где d — диаметр наносов в м,
γ и γ_1 — объемный вес наносов и воды кг/м^3,
H — глубина в м,
J — уклон,
φ — безразмерное число, величина которого $\leqslant 25$ и уменьшается с увеличением интенсивности русловых процессов.

В результате обработки анализа полевых материалов по рекам Средней Азии нами получена кривая зависимости удельного содержания донных наносов от упомянутого числа:

$$g_t = f(\varphi) \qquad (7)$$

где g — удельное содержание донных наносов кг/м^3.

После определения параметров кривой функция (7) приняла вид расчетной формулы для определения расхода донных наносов

$$g = 0{,}016\,\gamma(\varphi_1 - \varphi_{10})^{3/2}$$

где

$$\varphi_1 = \frac{1}{\varphi} = \frac{\gamma H J}{d(\gamma_1 - \gamma)} \text{ и } \varphi_{10} = \frac{1}{\varphi_0} \qquad (8)$$

Кривая зависимости (7) позволила нам установить следующие предельные значения:

а) удельное содержание движущихся по дну наносов не превышает 2,5—3 кг/м^3;

б) началу движения донных наносов соответствует числовая величина $\varphi_0 = 2{,}5$; началу массового влечения всех фракций (взвешивания) соответствует числовая величина $\varphi_{взв} = 2{,}5$. Следовательно, при значении $\varphi > 25$ наносы диаметром d не движутся. При значении $25 > \varphi > 2{,}5$ наносы движутся по дну и в придонном слое потока. При значении $\varphi < 2{,}5$ наносы движутся во взвешенном состоянии. Таким образом, число φ может служить критерием для расчета незаиляемых каналов и отстойников ($\varphi \geqslant 25$).

Анализ данных, использованных для построения кривой зависимости (7) позволил нам также найти:

1) связь между замеренными и предельными значениями скорости и числа φ в виде:

$$\frac{V_0}{V} = \sqrt{\frac{\varphi}{\varphi_0}} \qquad (9)$$

или

$$\frac{V_0}{V} = 0{,}2\sqrt{\varphi},$$

где $\varphi_0 = 25$.

откуда, подставив в (9) вместо V ее выражение $V = C\sqrt{HJ}$, получим выражение предельного значения скорости в виде:

$$V_0 = 0{,}2\,C\sqrt{\frac{d(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma}} \qquad (10)$$

2) Связь между влекущей силой и числом φ выражается отношением $\frac{S_0}{S} = \frac{\varphi}{\varphi_0}$, а предельное значение влекущей силы в виде:

$$S_0 = 0{,}04\,\varphi S = 0{,}04\,d(\gamma_1 - \gamma),$$

где $$\varphi S = \frac{d(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma H J} \cdot \gamma H J = d(\gamma_1 - \gamma) \qquad (11)$$

Установлена также связь между коэфициентом формы m в формуле $B^m = KH$ С. Т. Алтунина и критерием русловых процессов φ или влекущей силой S в следующем виде:

$$m = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{0,1} = \left(\frac{S_0}{S}\right)^{0,1} = 0{,}72\,\varphi^{0,1} \qquad (12)$$

Получена расчетная зависимость коэфициента шероховатости n для естественных аллювиальных русел от числа φ в следующем виде:

$$n = 0{,}0476\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{0,2}$$

или, после подстановки значения $\varphi_0 = 25$, получим

$$n = 0{,}025\,\varphi^{0,2} \qquad (13)$$

Согласно выражению (13) коэфициент n в естественных водотоках изменяется в пределах ~ от 0,020 (при $\varphi = 0{,}4$) для низовий рек, где все наносы движутся во взвешенном состоянии, и до 0,0476 (при $\varphi = 25$) на горных участках в межень, когда наносы не движутся.

Таким образом, приведенные выше зависимости (7)—(13) характеризуют взаимодействие между потоком и аллювиальным руслом в реках. Указанные зависимости показывают также, что характерные коэфициенты, как, например, m в формуле (3), коэфициент шероховатости n и предельные значения скорости и влекущей силы—оказалось возможным выразить через число φ.

3. Ширина устойчивого русла реки

При проектировании водозаборных узлов на реках с блуждающим руслом встречаются затруднения при определении ширины подводящего русла. В результате обработки обширных данных полевых исследований на реках Средней Азии, проф. С. Т. Алтуниным получена связь между шириной реки по зеркалу воды „B", руслоформирующим расходом „Q" и уклоном J следующего вида:

$$B = A \frac{Q^{2y}}{J^{y}} \qquad (14)$$

где

$$y = \frac{3}{2(3 + 5m)}$$

Множитель „A" автор назвал коэфициентом устойчивой ширины русла, величина которого изменяется в пределах от 0,7 до 1,5, а величина показателя степени „y" изменяется в пределах от 0,275 до 0,187, причем наименьшее значение „A" и „y" соответствует горным участкам, а наибольшее—низовьям рек.

Формула (14) рекомендуется для расчета подводящих и отводящих участков русла при водозаборе.

Связь ширины реки с другими элементами потока также представляется возможным выразить в очень простой форме, использовав для этого известное число Фруда, имеющее общий вид:

$$\frac{v^2}{gl} \qquad (15)$$

где l — характерный линейный размер потока.

Если в (15) в качестве характерного линейного размера подставить некоторую длину участка реки, то получим выражение:

$$\frac{v^2}{gL} \qquad (16)$$

Не трудно видеть, что выражение (16) представляет отношение удвоенного скоростного напора к некоторой длине потока, т. е. удвоенный уклон поверхности воды на этом участке:

$$\frac{v^2}{gL} = \frac{2h}{L} = 2J \qquad (16')$$

Отнеся же скоростной напор к ширине реки, получим то же выражение (16) в виде:

$$\frac{v^2}{gB} = \frac{2h}{B} \qquad (16'')$$

где $h = \frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор.

Поскольку плановые размеры потока (ширина и длина) изменяются в одном масштабе, т. е. по линейному закону подобия, выражения (16′) и (16″), очевидно, будут пропорциональны между собой, т. е.

$$2J = K \frac{2h}{B}$$ или

$$B = K \frac{h}{J} \qquad (17)$$

Коэфициент пропорциональности „K" в выражении (17) представляет собой удвоенное отношение чисел φ_1 замеренного к его предельному значению в степени 0,4, т. е. $K = 2\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{0,4} = 0,55\varphi^{0,4}$. Подставив его в (17), получим:

$$B = 2\left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^{0,4} \frac{h}{J} = 0,55\varphi^{0,4} \frac{h}{J} \qquad (18)$$

4. О методике моделирования русел рек

Критерием динамического подобия потока служит, как известно, безразмерное число Фруда $\frac{v^2}{gH}$. Поток модели считается динамически подобным натурному, если величина числа Фруда на модели равна величине того же числа в натуре, т. е. соблюдается равенство

$$\frac{V^2}{g_н H} = \frac{v^2}{g_м h}, \qquad (19)$$

полученное из выражения основного закона динамического подобия Ньютона.

Поэтому равенство (19) принимается как условие для определения масштаба скорости потока как неразмываемых, так и размываемых моделей русел. Масштабный коэфициент для скорости будет равен

$$\frac{V^2}{v^2} = \frac{g_н H}{g_м h}$$ и при $g_н = g_м$

$$\alpha_v^2 = \alpha_h \qquad (20)$$

Согласно существующей методике моделирования форма русла модели принимается геометрически подобной натурной, т. е. линейные масштабы (горизонтальный и вертикальный) принимаются равными между собою $\alpha_в = \alpha_h$.

Кроме того, при расчете размываемых моделей по существующей методике транспортирующая способность потока на модели определяется, исходя из условия пропорциональности диаметра наносов квадрату скорости $d = Kv^2$, т. е. в качестве критерия подобия русловых процессов принимается выражение $\frac{v^2}{gd}$, которое считают безразмерным числом, аналогичным числу Фруда. В последнем выражении в качестве характерного линейного размера находят возможным поставить диаметр наносов. Из равенства величины указанного числа на модели и в натуре

$$\frac{v^2}{g_н d_н} = \frac{v^2}{g_м d_м} \tag{21}$$

получают масштабный коэфициент для диаметра наносов

$$\alpha = \frac{d_н}{d_м} = \frac{\alpha_{v^2}}{\alpha_g}$$

и, принимая $\alpha_g = 1$, получают

$$\alpha_d = \alpha_{v^2} \tag{22}$$

Следовательно, по существующей методике, основанной на принципе геометрического подобия, масштабные коэфициенты для элементов потока получаются следующие:

для скорости $\alpha_v = \alpha_h^{0,5} = \alpha_в^{0,5}$

для площади живого сечения $\alpha_\omega = \alpha_h \cdot \alpha_в = \alpha_в^2$

„ расхода $\alpha_q = \alpha_в^{2,5}$

„ уклона $\alpha_i = \frac{\alpha_h}{\alpha_в} = 1$

„ коэфициента скорости $\alpha_c = \alpha_v \cdot \alpha_h^{-0,5} \alpha_i^{-0,5} = 1$

„ диаметра наносов $\alpha_d = \alpha_v^2 = \alpha_h$ (23)

Практика моделирования русел рек показала, что существующая методика расчета размываемых моделей русел, основанная на принципе геометрического подобия линейных размеров, неверна.

Полевыми исследованиями установлено, что геометрического подобия линейных размеров естественных русел и их моделей не существует.

Русло модели, как и реки, создается самим потоком в результате взаимодействия с окружающим его размываемым ложем.

В результате упомянутого взаимодействия сформировывается русло, в котором устанавливаются отношения между горизонтальными и вертикальными размерами, отличные от натурных. Так, например, отношение ширины потока к глубине $\frac{B}{h}$ и коэфициент скорости „C" на модели будут всегда меньше, а уклон поверхности воды I—больше, чем в натуре; по существующей же методике расчета упомянутые элементы принимаются равными натурным.

Упомянутое выше число $\frac{v^2}{gd}$ не является безразмерным и, следовательно, не может служить критерием при расчете подвижности наносов. Последняя характеризуется крупностью и удельным весом наносов и пропорциональна влекущей силе, а не квадрату скорости, вследствие чего равенство (22) на размываемой модели не соблюдается.

Таким образом, на модели, рассчитанной на основе принципа геометрического подобия, искажаются форма русла и русловые процессы. Разработанная нами и изложенная ниже методика расчета размываемых моделей основана на зависимостях, выражающих закономерности русловых процессов и их связь с формой русла. Согласно этой методике в лаборатории создается в малых размерах подлежащий изучению участок реки, сходный с прототипом по русловым процессам и форме русла. Упомянутое сходство русловых процессов характеризуется безразмерным числом φ, полученным из соотношения сил—силы влечения потока и вызванной ею силы сопротивления движению частиц аллювиального дна.

Русловые процессы модели будут подобными натурным и соотношения (8—13) будут удовлетворять данным модели и натуры, если величина числа φ на модели равна величине того же числа в натуре, т. е.

$$\frac{d_н(\gamma_{1н} - \gamma)}{\gamma H J} = \frac{d_м(\gamma_{1м} - \gamma)}{\gamma h I} \tag{27}$$

Из равенства (27) получим масштабный коэфициент для диаметра наносов:

$$\alpha_d = \frac{d_н}{d_м} = \frac{HJ}{hI}\left(\frac{\gamma_{1м} - \gamma}{\gamma_{1н} - \gamma}\right) = \frac{\alpha_h \cdot \alpha_I}{\alpha_\gamma}, \tag{28}$$

который равен произведению масштабных коэфициентов для глубины и уклона, деленному на масштабный коэфициент веса наносов в воде. Масштаб скорости определяется из равенства (19).

Связь русловых процессов с формой русла выражается в нижеследующих зависимостях:

1. Кривые зависимости между шириной и глубиной $B = f(H)$ (29)

имеют нелинейный характер, а поэтому отношение ширины реки к глубине на моделируемом участке нельзя считать равным таковому на модели, т. е.

$$\frac{B}{H} \neq \frac{b}{h}$$

Написав это неравенство в виде $\frac{B}{b} \neq \frac{H}{h}$, видим, что масштабный множитель ширины $\frac{B}{b} = \alpha_в$ не равен масштабному множителю глубины $\frac{H}{h} = \alpha_h$; имеем

$$\alpha_в \neq \alpha_h \tag{30}$$

Неравенство (30) показывает, что принцип геометрического подобия к расчету размываемых русловых моделей не применим.

2) Согласно указанным зависимостям отношение $\frac{B}{H}$ на больших реках больше, чем на малых и ручьях.

Рассматривая модель как реку очень малых размеров, мы можем написать $\frac{B}{H} > \frac{b}{h}$.

Написав это неравенство в виде $\frac{B}{b} > \frac{H}{h}$, будем иметь неравенство, в котором левая часть представляет масштабный множитель ширины $\alpha_в$, а правая — масштабный множитель глубины α_h, т. е. $\alpha_в > \alpha_h$ или равенство

$$\alpha_в^m = \alpha_h \tag{31}$$

где $m < 1$.

Равенство (31) показывает, что для расчета размываемых русловых моделей должен применяться принцип нелинейного подобия, предполагающий отношение горизонтального масштабного множителя к вертикальному больше единицы.

Написав равенство (31) в виде

$$\frac{B^m}{H} = \frac{b^m}{h} = K = \mathrm{const} \tag{32}$$

получаем аналитичное выражение зависимости (29) между шириной и глубиной для модели и натуры.

Равенство (32) должно служить условием (критерием) подобия формы русла при расчете размываемых моделей рек.

Выражение (32) для рек получено проф. Алтуниным С. Т. эмпирическим путем на основе материала полевых исследований по рекам Средней Азии[1].

3) Если на различных по размерам реках выделить участки по их длине от истоков к устьям, сходные по русловым процессам, и составить для каждого из этих участков кривые зависимости ширины от глубины $B = f(H)$, то увидим, что эти кривые имеют различные угловые коэфициенты m, величина которых будет уменьшаться по направлению вниз по течению реки.

Следовательно, соотношение между горизонтальными и вертикальными масштабами модели, выраженное равенством (31), должно быть не произвольным, а строго определенным и различным для различных по русловым процессам участков реки, т. е. зависящим от величины m, а также от величины самих масштабных уменьшений.

Поэтому расчетной формулой для определения соотношения между масштабами модели являются равенство (31) и выражение для „m“ (12).

Поэтому, зная величину φ и задавшись величиной одного из масштабных уменьшений, например, $\alpha_в$ получаем величину „α_h“ из равенства

$$\lg \alpha_h = m \lg \alpha_в = 0{,}72\varphi^{0,1} \lg \alpha_в \tag{33}$$

Из уравнения (33) вытекает, что горизонтальный и вертикальный масштабы могут быть равны только в случае равенства $\varphi = \varphi_0$ и $m = 1$, т. е. в момент предельного равновесия между движением и покоем наносов. Как только начнется движение наносов, нарушится указанное равенство, бытовое значение φ станет меньше предельного и, следовательно, вертикальное масштабное уменьшение станет меньше горизонтального. Это доказывает, что сформировать русло модели при сохранении равенства линейных масштабов модели $\alpha_в = \alpha_h$, т. е. при $m = 1$, невозможно.

Ниже приводятся масштабные коэфициенты элементов потока, выраженные через линейные масштабы модели.

Для скорости

$$\alpha_v = \frac{V}{v} = \sqrt{\frac{H}{h}} = \sqrt{\alpha_h}$$

а используя равенство (31), получим $\alpha_v = \alpha_в^{0,5m}$

Для площади живого сечения

$$\alpha_\omega = \alpha_в \cdot \alpha_h = \alpha_в^{m+1} \tag{34}$$

Для расхода

$$\alpha_q = \alpha_v \cdot \alpha_\omega = \alpha_в \cdot \alpha_h^{3/2} = \alpha_в^{1+1,5m}$$

---

[1] С. Т. Алтунин. Регулирование русел рек при водозаборе. Сельхозгиз, 1950 г., стр 49

для уклона $\alpha_i = \frac{\alpha_h}{\alpha_в} = \frac{1}{\alpha_в^{1-m}} = \alpha_в^{m-1}$

для коэфициента „C“ $\alpha_c = \frac{\alpha_v}{\sqrt{\alpha_h \alpha_i}} = \sqrt{\frac{\alpha_в}{\alpha_h}} = \alpha_в^{0,5(1-m)}$

„ диаметра наносов $\alpha_d = \frac{\alpha_h^2}{\alpha_в} = \alpha_в^{2m-1} \cdot \alpha_\gamma^{-1}$

Для определения масштаба расхода донных наносов на модели до настоящего времени нет достаточно обоснованного выражения.

Винкель, например, предлагает определять масштаб для количества наносов, исходя из условия равенства на модели и в натуре выражений $G = B(\xi\gamma HJ)^6$

$$\alpha_G = \frac{G_н}{G_м} = \frac{B}{B}\left(\frac{\xi\gamma HJ}{\xi\gamma hI}\right),$$

откуда при $\xi_н = \xi_м$ получает

$$\alpha_G = \alpha_в \cdot \alpha_h^6 \cdot \alpha_i^6 = \frac{\alpha_h^{12}}{\alpha_в^5} \qquad (35)$$

Предложение Винкеля теоретически не обосновано, и поэтому пользоваться им нет оснований.

Вопрос о масштабе расхода наносов разрешается просто.

Так как удельное содержание наносов есть величина безразмерная, то равенство $g_{t\,н} = g_{t\,м}$, как и равенство чисел φ, должно приниматься как условие подобия русловых процессов модели и натуры. Следовательно, масштаб удельного содержания наносов равен единице:

$$\alpha_g = \frac{g_{t\,н}}{g_{t\,м}} = 1 \qquad (36)$$

а масштаб секундного расхода наносов равен масштабу расхода воды

$$\alpha_g = \alpha_в \cdot \alpha_h^{3/2} = \alpha_в^{1+1,5m} \qquad (37)$$

Расчет количества донных наносов модели производится по нашей формуле (8).

Предлагаемые нами расчетные зависимости основаны на большом полевом и лабораторном экспериментальном материале и поэтому являются достаточно надежными.

Указанные зависимости проверены практикой на многих моделях в гидротехнической лаборатории САНИИРИ, а также в лаборатории Института сооружений Академии наук УзССР и оправдали себя как теоретически правильные, выражающие физическую сущность явления, его закономерность. Это позволяет нам сказать, что изложенные выше результаты исследований представляют шаг вперед на пути разрешения сложной проблемы динамики русловых потоков.

5. Результаты лабораторных опытов по формированию русла при водозаборе

Описанная выше методика моделирования была впервые применена в гидротехнической лаборатории САНИИРИ в 1948 г. при расчете модели русла реки Сыр-Дарья в нижнем ее течении. На указанной модели изучались вопросы формирования русла в бытовых условиях, а также в верхнем и нижнем бьефах после преграждения реки плотиной.

На модели был воспроизведен участок реки около 11 км в масштабах: горизонтальном 1:200 и вертикальном 1:25. В качестве наносов применялась паровозная изгарь крупностью до трех мм и удельным весом 1 8.

В результате формирования русла модели получено хорошее сходство фактически установившихся элементов потока с расчетными. Опыты на указанной модели показали также, что в случае невозможности масштабирования наносов (мелкий песок) возможно и целесообразно применение заменителя, по физическим и гидравлическим свойствам сходного с натурным песком, но с меньшим удельным весом (масштабирование крупности и удельного веса).

Результаты формирования русла модели приводятся в таблице № 1.

6. Результаты лабораторных опытов по регулированию русла

Ввиду того, что блуждающие русла при водозаборе всегда нуждаются в регулировании, нами были проведены лабораторные опыты по изучению работы сквозных заилителей.

К настоящему времени в гидротехнической практике по регулированию русел наибольшее применение находят сплошные (массивные), сквозные (решетчатые) и струенаправляющие сооружения.

Исследованные нами сквозные заилители были применены на Аму-Дарье, как более эффективные и дешевые по сравнению со сплошными полузапрудами. Что же касается струенаправляющих систем профессора Потапова М. В., то они находят все большее применение для отвлечения наносов от голов каналов.

Массивные шпоры имеют тот существенный недостаток, что они,

ТАБЛИЦА 1

гидравлических элементов натуры и модели при расходе 1200 $м^3$/сек.

№№	Площадь $м^2$			Ширина B м			Средняя глубина H м			Средн. скор. м/сек.			Коэфициент Шези C		
	натура	модель		натура	модель		натура	модель		натура	модель		натура	модель	
		расч.	факт.		расч.	факт.		расч.	факт.		расч.	факт.		расч.	факт.
3	970	0,161	0,187	232	1,16	1,16	4,5	0,150	0,161	1,24	0,22	0,25	44,5	17,2	35,3
4	1165	0,194	0,182	239	1,20	1,20	5,15	0,171	0,152	1,03	0,19	0,26	35,0	18,5	36,3
6	965	0,161	0,160	290	1,45	1,45	4,0	0,133	0,110	1,25	0,25	0,30	48,5	18,8	39,6
7	1150	0,191	0,171	250	1,25	1,25	4,85	0,162	0,136	1,04	0,19	0,23	37,2	14,4	43,0
ср.	1062	0,177	0,175	252	1,26	1,26	4,22	0,140	0,138	1,14	0,20	0,274	45,2	17,5	33,6

Уклон поверхности воды: в натуре $J \equiv 0{,}00015$
на модели 0,00047

Фактически установившиеся масштабы:
горизонтальный — 1/200
вертикальный — 1/30

преграждая путь направленному на них потоку, вызывают водовороты как перед шпорой, так и за шпорой, вследствие чего происходит размыв дна у головы шпоры и берега перед шпорой и за ней.

Сквозные шпоры преграждают путь не всей массе воды, направленной на них, а только части ее, а часть пропускают через себя; поэтому они не вызывают водоворотов, а, следовательно, размыва берега перед шпорой и за ней, как это имеет место у глухих шпор.

В лаборатории было проведено несколько серий опытов при жестком и размываемом дне. В качестве размываемого материала применялся песок средней крупностью 0,14 мм.

В качестве сквозных сооружений применялись деревянные и металлические решетки из вертикальных стержней круглого сечения различных диаметров и различной ширины и застройки, причем под застройкой подразумевается отношение площади живого сечения, образуемого стержнями решетки F_1, ко всей площади живого сечения, занимаемого решеткой F. Если обозначить ширину зазора между стержнями через S, а диаметр стержня через d, то будем иметь:

$$P = \frac{F_1}{F} = \frac{d \cdot h}{(S+d)h} = \frac{d}{S+d}$$

Первой серией опытов определялась величина перепада, создаваемого решеткой (сквозной шпорой), т. е. разность горизонтов воды в сечениях непосредственно перед решеткой и за ней в зависимости от застройки — P и от скорости течения V, т. е.

$$z = f(P_1 V) \tag{38}$$

с твердым и размываемым дном, а также глубина размыва дна в створе решетки в зависимости от тех же переменных, т. е.

$$t = f(P_1 V) \tag{39}$$

На основании полученных результатов опытов для зависимости (38) получено следующее выражение:

$$z = KP^{3/2} \frac{V^2}{2g} \tag{40}$$

где P — застройка шпоры,
v — ср. скорость потока до установки шпоры (бытовая),
K — коэфициент, зависящий от размываемости дна и от обтекаемости стержней решетки.

Величина коэфициента „K“ получена для твердого дна равной 4.
10, а для размываемого из песка крупностью 0,14 мм равной
Далее опытами установлено, что глубина размыва в створе решетки (шпоры) t — зависит от застройки решетки и скорости течения в той же степени, что и перепад z, и выражение (39) отличается от выражения (40) только величиной коэфициента, зависящего от размываемости дна, т. е.

$$t = K_t P^{3/2} \frac{v^2}{2g} \qquad (41)$$

Величина коэфициента K_t для применяемого в опытах песка ($d = 0,14$ мм) получена равной 50.

Следовательно, как показали опыты, для данного грунта глубина размыва в створе шпоры прямо пропорциональна перепаду

$$t = mz \qquad (42)$$

т. е. пропорциональна застройке шпоры в степени 3/2 и прямо пропорциональна скоростному напору.

Величина „m“ для применяемого в опытах песка получена равной 12,5.

Опытами выяснено, что сквозная шпора отклоняет часть расхода воды, пропорциональную застройке шпоры. Так, если обозначим расход на указанной ширине до установки шпоры через Q, то часть расхода, проходящего через шпору, будет равна $Q\,(1 - P)$, и если средняя скорость потока в створе несколько ниже устраиваемой шпоры до ее установки была равна $V_б = \frac{Q}{\omega}$, то после установки шпоры будет равна:

$$V_1 = \frac{Q\,(1 - P)}{\omega} = V_б\,(1 - P) \qquad (43)$$

где ω — площадь живого сечения на застраиваемой шпорой ширине потока,

P — застройка шпоры,

$V_б$ — средняя скорость, соответствующая расходу Q и площади ω в створе ниже устраиваемой шпоры до ее установки (бытовая),

V_1 — ср. скорость в том же створе после установки шпоры.

Уравнение (43) справедливо и для каждой последующей шпоры в системе.

Опыты показали, что длина, на которую распространяется влияние шпоры или системы шпор, зависит от ширины застроенной шпорами полосы потока (длины шпор), их застройки и кривизны берега (от угла подхода потока к берегу) и выражается следующей формулой

$$L = KlP\cos\alpha \qquad (44)$$

согласно (43) $P = 1 - \frac{V_1}{V_б}$,

тогда вместо (44) получим:

$$L = Kl\left(1 - \frac{V_1}{V_б}\right)\cos\alpha \qquad (44')$$

где L — длина полосы вдоль берега, на которую распространяется действие шпоры или системы,

l — длина одиночной, а в системе последней шпоры,

K — опытный коэфициент, равный 22,

P — застройка шпоры,

V_1 — средняя скорость за системой,

$V_б$ — средняя скорость в том же створе до установки шпоры.

α — угол между направлением потока и касательной к линии берега.

Согласно выражению (44) при $\frac{V_1}{V_б} = 0$, т. е. при полном погашении скорости за системой, формулы (44) и (44′) примут вид:

$$L = Kl\cos\alpha$$

т. е.

$$L = 22\,l\cos\alpha \qquad (45)$$

Это будет предельная длина распространения действия системы.

Длина L за системой с нерядовым расположением материала: из свай вразброску, тетраэдров, веток и др. — рассчитывается также по формуле (44).

Расстояния между шпорами определяются по формулам (44) и (44′) но с коэфициентом, меньшим предельного; если бы мы приняли для расчета расстояний между шпорами предельный коэфициент, то допустили бы полное восстановление скоростей за системой до бытовой их величины и тогда каждая шпора работала бы как одиночная. Поэтому для указанных расчетов следует ввести в формулы (44) и (44′) переменный коэфициент „C“, меньший единицы, тогда указанные формулы примут вид:

$$L = KCPl\cos\alpha$$

$$L = KCP\left(1 - \frac{V_1}{V_б}\right)\cos\alpha \qquad (46)$$

Величина коэфициента „C“ назначается в зависимости от того, какой величины скорости между шпорами мы запроектируем. Рассчитанные по формулам (46) расстояния между шпорами предполагают установление между шпорами постоянных скоростей, равных:

$$V_n = (V_{n-1} + V_б CP)(1 - P) \qquad (47)$$

$$\text{в пределе } V_{шп} = V_б C(1 - P)$$

Длина каждой шпоры (за исключением первой, длина которой назначается) рассчитывается в зависимости от величины расстояния между шпорами по формуле:

$$l_n = l_{n-1}(1 + CP) = l_{n-1} + l_{n-1}CP \qquad (48)$$

где l_n и l_{n-1} — длина шпор последующей и предыдущей соответственно, считая в направлении течения,

C — коэфициент в формулах (46),

P — застройка шпоры.

Рассчитанная по формулам (44—48) система шпор образует плановую кривую линию их оголовков, выдвинутую от берега в поток.

Длина шпор и расстояния между ними рассчитываются по формуле (48) до тех пор, пока не будет достигнута достаточная ширина застроенной полосы, после чего шпоры не удлиняются, а следовательно, и расстояния между ними не рассчитываются, а принимаются постоянными, равными расстоянию между последними двумя шпорами.

Следовательно, данные лабораторных опытов по исследованию гидравлики сквозных заилителей позволили нам решить очень важные вопросы, связанные с гидравлическим расчетом и компоновкой систем из сквозных шпор, предназначенных для целей выправления русел у водозаборных и других сооружений и защиты берегов от размыва. Системы сквозных заилителей из свай, при правильной их компоновке, несомненно, дадут хорошие результаты, и можно с полной уверенностью в успехе рекомендовать их для указанной выше цели, как долговечные и надежные сооружения.

Таким образом на основании проведенных исследований в диссертационной работе освещаются важные вопросы русловой гидротехники:

1. Формирование речных русел. Получены морфометрические зависимости.

2. О моделировании размываемых русел. Даются уравнения для расчета моделей.

3. О выправлении речных русел при помощи систем из сквозных заилителей и их гидравлический расчет.

Указанные результаты исследований в большей своей части проверены опытом в лаборатории и в натуре.

Р 30858 тип. сазпи 100—475—52