МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

СРЕДНЕАЗИАТСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ИРРИГАЦИИ имени В. Д. ЖУРИНА (САНИИРИ)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ВЫПУСК 162

ПРОБЛЕМА ПЕРЕБРОСКИ ЧАСТИ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК В СРЕДНЮЮ АЗИЮ И КАЗАХСТАН

Ташкент—1981

МИНИСТЕРСТВО МЕЛИОРАЦИИ И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР

Среднеазиатский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт ирригации имени В. Д. Журина (САНИИРИ)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 162

Проблема переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан

Ташкент—1981

УДК 532+626/627+626.8:008

В книге на основе лабораторных и производственных исследований САНИИРИ даются научные разработки в области гидравлики и гидротехнических сооружений больших гидромелиоративных систем; изучается гидравлика крупных каналов; исследуется форма предполагаемого русла; предлагаются разработки технологических процессов строительства больших каналов комплексным механизированным методом (шагающие экскаваторы и др.); дается прогноз качества воды и гидробиологического режима рек в связи с переброской части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан.

Книга предназначается для научных работников, проектировщиков и работников службы эксплуатации крупных гидромелиоративных систем.

Редакционная коллегия:

Духовный В.А. (отв.редактор), Белоцерковский К.И., Валентини Г.Г., Дерлятка Т.И., Кадыров А.А., Мухамедов А.М., Мухтаров М.П., Пулатов А.Г., Скрыльников В.А., Якубов Х.И. (зам.редактора)

(С) Среднеазиатский научно-исследовательский институт ирригации им. В.Д.Журина (САНИИРИ), 1981 г.

А.А.КАДЫРОВ, канд.техн.наук
В.А.СКРЫЛЬНИКОВ, канд.техн.наук
З.Н.НУРИТДИНОВ, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕРАЗМЫВАЮЩИХ СКОРОСТЕЙ В КЫЗЫЛКУМСКОМ КАНАЛЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ

Главный канал переброски стока сибирских рек в значительной своей части проходит в мелкопесчаных грунтах. Его размеры, необходимые для пропуска проектных расходов воды I и II очереди (1000-2400 $м^3/с$), настолько велики, что каждый недоиспользованный сантиметр допустимой скорости течения обусловливает выполнение большого объема земляных работ, оцениваемых миллионами рублей.

Отсутствие опыта проектирования крупных каналов, далеко выходящих за пределы рекомендаций СНиПа, ограниченных расходами воды не более 50 $м^3/с$, ставит перед проектировщиками острую проблему выбора максимально допустимых скоростей течения, а также возможных устойчивых форм поперечных сечений, которые не вызывали бы развития в канале плановых русловых деформаций. Указанная проблема может быть решена путем проведения как лабораторных, так и натурных исследований на существующих крупных каналах, которые по характеристике грунтов, слагающих русло, гидравлическим уклонам и др. могли бы служить достаточно хорошим аналогом или моделью канала переброски.

Объектом исследований был выбран Кызылкумский канал в Чимкентской области Казахстана, получающий воду без наносов расходом до 150 $м^3/с$ из Чардаринского водохранилища. Дно канала на всем его протяжении сложено мелкопесчаными грунтами со средним диаметром d = 0,2 мм. Исследовались три участка канала.

Первый участок расположен на ПК 30 - ПК 50, где берега, представленные супесями, деформируются. Движение донных наносов на этом участке происходит в виде первичных гряд (высота

0,6–0,7 м, длина 20–25 м) в основном за счет размыва песчаных отложений дна и частично за счет наносов, поступающих от береговых деформаций. На этом участке производилось измерение скорости передвижения песчаных гряд.

На втором участке (ПК 60 – ПК 80) берега, сложенные супесью и суглинком на уровне уреза воды, заросли камышом, саксаулом и степной растительностью. Движение донных наносов за счет размыва отложений дна происходит здесь в виде крупных рифелей и мелких гряд (высота 0,1–0,15 м). На этом участке выполнялись измерения гидравлических элементов, расхода воды и скорости передвижения гряд.

На третьем участке берега, сложенные супесями и суглинками, не деформируются, а движение донных наносов осуществляется согласно эхограммам, полученным эхолотом "Кубань" только в виде мелких рифелей. Измерения гидравлических элементов потока производились в период, когда выполнялись замеры расходов воды на втором участке.

Указанные участки на Кызылкумском канале созданы подпором горизонта воды от сопрягающего сооружения, расположенного на ПК 120.

Для выяснения возможных нарушений параллельноструйности течения потока на участках ПК 30 – ПК 50 и ПК 60 – ПК 80 произведены съемка поперечных профилей и измерение вертушкой поверхностных скоростей в створах, расположенных на расстоянии 100 м друг от друга. Построенные по результатам съемки эпюры распределения поверхностных скоростей на участке ПК 60 – ПК 80 при расходе воды 135,5 $м^3/с$ показали, что динамическая ось потока искривлена и канал находится в стадии начала меандрирования русла. На поперечных сечениях, которые приводятся в статье, наибольшие глубины смещены от геометрической оси канала в сторону одного из берегов и расположены в зонах с наибольшими скоростями потока, достигающими 1,1 м. Смещение стрежня потока от центра и перемещение его в сторону берега совместно с ветровой волной приводят к некоторым деформациям берега. Но поскольку откос канала сложен в основном суглинистыми грунтами, то существенных деформаций на участке ПК 60 – ПК 80 не наблюдается, за исключением отдельных коротких участков, сложенных супесями, где наибольший размыв распространяется в глубь берега на 1,5–2,0 м.

На участке ПК 30 – ПК 50 деформация берегов канала происходит более интенсивно. Имеются обрывистые берега высотой 1,5–2,5 м, местами достигающие 3–4 м.

На рис. I показано изменение гидравлических элементов канала (участок ПК 60 – ПК 80), из которого следует, что глубина и средние скорости течения в канале изменяются плавно с изменением расхода воды. Уклоны же водной поверхности увеличиваются с ростом расходов до 35 $м^3/с$, затем уменьшаются в пределах 35 ÷ 75 $м^3/с$ и вновь увеличиваются при расходе более 75 $м^3/с$. Это можно объяснить влиянием на уклон водной поверхности в канале перепада на ПК I20, создаваемого сопрягающим сооружением, которое хотя и не имеет щитов, но в некоторые периоды создает подпор, распространяющийся вверх по течению. Так, при расходах воды от 35 до 75 $м^3/с$ за счет подпора уклоны водной поверхности в канале уменьшаются, при расходах более 75 $м^3/с$ и наличии спада у сооружения на ПК I20 уклоны увеличиваются за счет сокращения подпора.

В створе ПК II0 (третий участок), расположенном на I км выше перегораживающего сооружения, уклон водной поверхности при расходе воды I07 $м^3/с$ равен 0,000027, что более чем вдвое меньше проектного уклона канала 0,00006. Это также свидетельствует о подпоре, создаваемом сопрягающим сооружением.

Поперечное сечение канала в I978 г. в створе ПК 70, где измерялся расход воды, при сравнении его с проектным за период эксплуатации с I969 г. практически осталось без изменения.

Наблюдения за скоростью перемещения гряд проводили на участках ПК 30 – ПК 69. Полученные данные изменения скорости передвижения гряд в зависимости от расхода воды представлены на рис. 2. Кривая $V_{гр} = f(Q)$, проходящая по фактическим точкам для расходов от 30 до II0 $м^3/с$, может быть экстраполирована на такой расход воды, при котором прекратится движение гряд. Экстраполяция может быть выполнена приближенно путем продления кривой до пересечения с осью расходов. Если экстраполировать кривую для расходов воды менее 30 $м^3/с$ по касательной, то движение гряд прекратится при расходе I4 $м^3/с$. Если же сохранить криволинейную форму кривой экстраполяции, то можно принять расход I0 $м^3/с$.

Таким образом, движение гряд и донных наносов практически прекращается при расходах воды в пределах I4 ÷ I0 $м^3/с$.

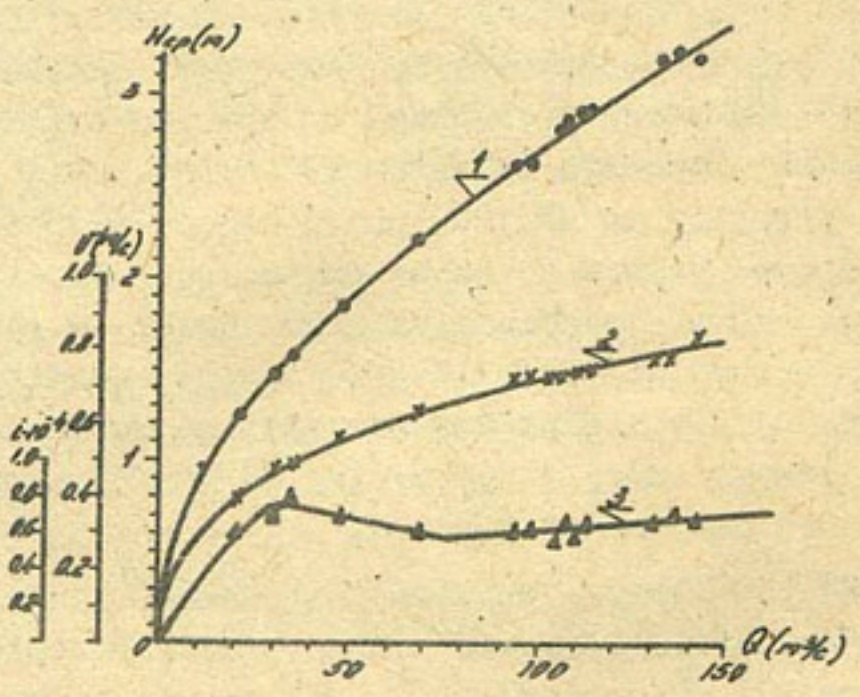


Рис.I Изменения средней скорости , средней глубины потока и уклона водной поверхности в Кызылкумском канале в створе ПК 70 в зависимости от расхода воды по измерениям (САНИИРИ, 1978 г):
I–H= $f(Q)$; 2– $v = f(Q)$; 3– $i = f(Q)$

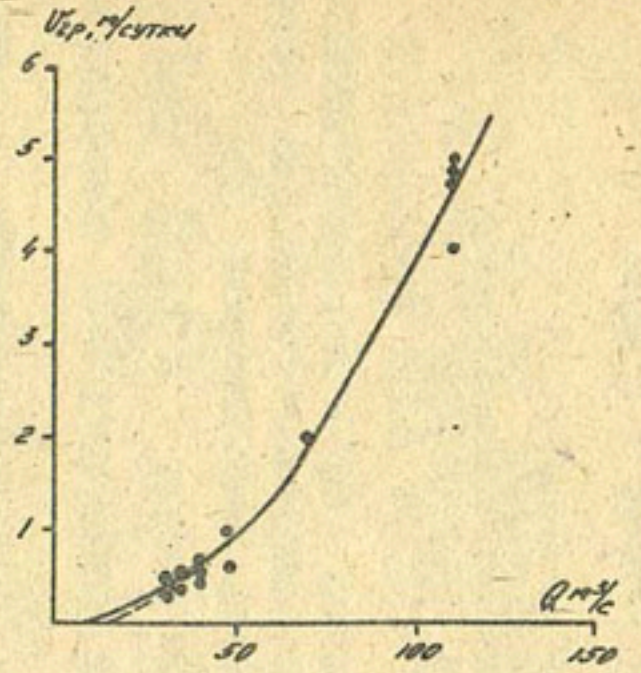


Рис.2 Изменение скорости перемещения гряды в Кызылкумском канале в зависимости от расхода воды (измерения САНИИРИ, 1978г).

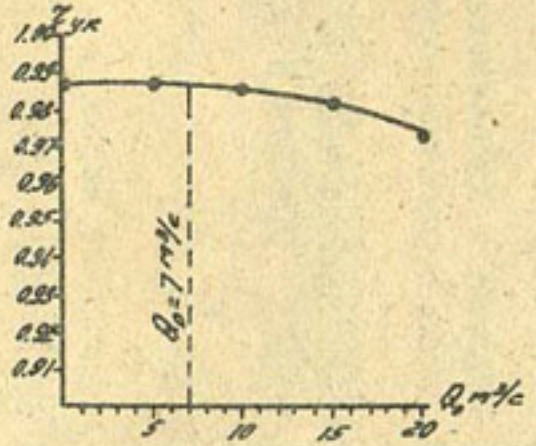


Рис.3- Изменение коэффициента корреляции в зависимости от принимаемых значений расхода воды, соответствующего условиям отсутствия движения гряд и наносов.

$V_{0*} = \sqrt{9,81 \cdot 0,87 \cdot 0,00003} = 0,02$

$8 = \sqrt{9,81 \cdot 1 \cdot 0,000041} = 0,016$

Гидравлические элементы канала, согласно рис. I, равны для расхода воды I0 м³/с

$H_{ср} = 0,87$ м ; $V_0 = 0,28$ м/с ; $J_0 = 0,00003$; →

для расхода воды I4 м³/с

$H_{ср} = 1,0$ м ; $V_0 = 0,33$ м/с ; $J_0 = 0,000041$.

Для более объективного подхода к определению Q_0 и V_0 был применен статистический метод обработки полученных натурных данных.

Исходя из характера кривой, проведенной через натурные точки, уравнение связи $V_{гр} = f(Q)$ принято в форме показательной функции

$$V_{гр} = a(Q - Q_0)^K \qquad (I)$$

Логарифмируя принятое выражение, имеем

$$\lg V_{гр} = K \lg(Q - Q_0) + \lg a \qquad (2)$$

или

$$y = Kx + b, \qquad (3)$$

где $y = \lg V_{гр}$; $x = \lg(Q - Q_0)$; $b = \lg a$.

Поскольку полученное уравнение (3) представляет уравнение прямой линии, то для оценки тесноты связи и определения его параметров могут быть использованы методы прямолинейной корреляции. В этом случае теснота связи оценивается величиной коэффициента корреляции, определяемой по формуле

$$r_{yx} = \frac{\sum_1^n (x_i - x_{ср})(y_c - y_{ср})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - x_{ср})^2 \sum_1^n (y_i - y_{ср})^2}} \qquad (4)$$

Очевидно, изменив величину Q_0, входящую в выражение (I), получим разные значения коэффициента корреляции. Теснота связи будет наилучшей для наибольшего значения r_{yx}.

Определение же Q_0 из условия $\frac{dr_{yx}}{dQ_0} = 0$ приводит к сложному уравнению, которое может быть решено только методом подбора.

Для упрощения таблиц и расчетов И.А.Бузунов предложил вычислять коэффициент корреляции по формуле

$V_{0*} = \sqrt{9,81 \cdot 0,87 \cdot 0,00003} = 0,02$

$8 = \sqrt{9,81 \cdot 1 \cdot 0,000041} = 0,016$

Гидравлические элементы канала, согласно рис. I, равны для расхода воды I0 м³/с

$H_{ср} = 0,87$ м ; $V_0 = 0,28$ м/с ; $J_0 = 0,00003$; →

для расхода воды I4 м³/с

$H_{ср} = 1,0$ м ; $V_0 = 0,33$ м/с ; $J_0 = 0,000041$.

Для более объективного подхода к определению Q_0 и V_0 был применен статистический метод обработки полученных натурных данных.

Исходя из характера кривой, проведенной через натурные точки, уравнение связи $V_{гр} = f(Q)$ принято в форме показательной функции

$$V_{гр} = a(Q - Q_0)^K \qquad (I)$$

Логарифмируя принятое выражение, имеем

$$\lg V_{гр} = K \lg(Q - Q_0) + \lg a \qquad (2)$$

или

$$y = Kx + b, \qquad (3)$$

где $y = \lg V_{гр}$; $x = \lg(Q - Q_0)$; $b = \lg a$.

Поскольку полученное уравнение (3) представляет уравнение прямой линии, то для оценки тесноты связи и определения его параметров могут быть использованы методы прямолинейной корреляции. В этом случае теснота связи оценивается величиной коэффициента корреляции, определяемой по формуле

$$r_{yx} = \frac{\sum_1^n (x_i - x_{ср})(y_c - y_{ср})}{\sqrt{\sum_1^n (x_i - x_{ср})^2 \sum_1^n (y_i - y_{ср})^2}} \qquad (4)$$

Очевидно, изменив величину Q_0, входящую в выражение (I), получим разные значения коэффициента корреляции. Теснота связи будет наилучшей для наибольшего значения r_{yx}.

Определение же Q_0 из условия $\frac{dr_{yx}}{dQ_0} = 0$ приводит к сложному уравнению, которое может быть решено только методом подбора.

Для упрощения таблиц и расчетов И.А.Бузунов предложил вычислять коэффициент корреляции по формуле

$\gamma_{0x} = \sqrt{9,81 \cdot 1 \cdot 0,000041} = 0,020$ $V_0 = 0,33$

V_0
0,054
4,81
5,79

$$\gamma_{yx} \frac{\sum_1^n x_i y_i - \frac{\sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n}}{\sqrt{\left[\sum_1^n x_i^2 - \frac{(\sum_1^n x_i)^2}{n}\right]\left[\sum y_i^2 - \frac{(\sum_1^n y_i)^2}{n}\right]}} \quad (5)$$

Эта формула получена из традиционной формулы (4). Раскрыв скобки и произведя соответствующие действия над входящими в нее многочленами с заменой $x_{ср} = \frac{\sum_1^n x_i}{n}$ и $y_{ср} = \frac{\sum_1^n y_i}{n}$, получили следующие выражения:

$$\sum_1^n (x_i - x_{ср})(y_i - y_{ср}) = \sum_1^n x_i y_i - x_i \cdot y_{ср} - y_i x_{ср} + x_{ср} \cdot y_{ср}) =$$

$$= \sum_1^n \cdot x_i y_i - x_{ср} \sum_1^n y_i - y_{ср} \cdot \sum_1^n x_i + n(x_{ср} \cdot y_{ср}) = \sum_1^n x_i \cdot y_i -$$

$$- \frac{\sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n} \quad \sum_1^n (x_i - x_{ср})^2 = \sum_1^n (x_i^2 - 2x_i \cdot x_{ср} + x_{ср}^2) = \sum_1^n x_i^2 - \frac{(\sum_1^n x_i)^2}{n}$$

Преимуществом преобразованной формулы является то, что расчетные таблицы по формуле (5) будут иметь на две графы меньше, так как не требуется вычисление разницы $(x_i - x_{ср})$ и $(y_i - y_{ср})$.

Кроме того, в случае ошибки в вычислениях Σx_i и Σy_i, а также $x_{ср}$ и $y_{ср}$ нет необходимости пересчитывать таблицу; ошибка исправляется пересчетом только величины γ_{yx}.

Построенный по данным расчета график (рис. 3) $\gamma_{yx} = f(Q_0)$ имеет максимум γ_{yx} = 0,988 до расхода Q_0 = 7 м^3/с. Гидравлические элементы канала для расхода Q_0 = 7 м^3/с равны $H_{ср}$ = 0,7 м, J = 0,2 х I0^{-4}, V_0 = 0,24 м/с. Но для расходов воды I0 м^3/с и I4 м^3/с коэффициент корреляции достаточно высок. Гидравлические элементы, а также скорости при этих расходах можно принять в качестве неразмывающих. Для определения неразмывающей скорости при различных глубинах потока можно использовать любую из существующих многочисленных формул.

Нами использованы прежде всего формулы, в структуре которых содержится значение неразмывающей (размывающей) скорости при глубине H = I,0 м. С.Х.Абальянц / I / для определения средней скорости предложил следующие формулы:

а) минимальная неподвижающая

$$v = 0{,}36\, R^{1/4} \qquad (6)$$

б) минимальная по началу подвижки

$$v = 0{,}385\, R^{1/4}, \qquad (7)$$

где v_{01} = 0,36 м/с и v_{01} = 0,385 м/с – предельные скорости, соответствующие двум указанным состояниям при R = I м.

Скорость течения определяли по формуле А.А.Кадырова /2/

$$v = 3{,}71\, H^{0{,}247}\, d^{0{,}253} \qquad (8)$$

Численные значения коэффициента пропорциональности и показателей степени в формуле (8) получены путем обработки как лабораторных, так и натурных данных (Волга, Ангара). Скорость потока по этой формуле будет близка к размывающей / 2 /.

Незакрепленные каналы и реки всегда транспортируют хотя бы в ограниченном количестве наносы, в том числе и глинистые частицы во взвешенном состоянии. Влияние этих факторов на величину предельно допустимой скорости рассматривается в работе / I /. При d = 0,0002 м формулу (8) можно представить в виде

$$v = 0{,}43\, H^{0{,}247}, \qquad (9)$$

где v_{01} = 0,43 м/с – допустимая скорость течения при H = I м и ограниченном движении наносов.

Размывающую скорость найдем по формуле А.А.Черкасова / 4 /

$$v_p = \alpha\, v_{01}\, R^m, \qquad (10)$$

где α = I,0 ; v_{01} = 0,35–0,55 м/с (при R = I м),

$m = \frac{1}{2}$ (для $0{,}05 < d < 0{,}25$ мм составляющих 80% пробы).

Неразмывающие скорости, замеренные при глубинах $H < 1$ м, можно привести к глубинам I м, согласно выражению, полученному из (6), следующего вида:

$$v_{01} = v_c' \left(\frac{1}{R}\right)^{\frac{1}{4}}, \qquad (11)$$

где V_c' – неразмывающие скорости при $H < H = I$ м.

Ниже представлены результаты вычислений неразмывающей скорости при глубине $H = I,0$ м для расходов воды, при которых отсутствует движение наносов.

Q_0, $м^3/с$	H, м	V_c, м/с	V_{01} по формуле (II)
7	0,7	0,242	0,265
I0	0,87	0,28	0,29
I4	I,0	0,33	0,33
83,4I	3,3	0,42	0,32

Сопоставляя коэффициенты формул (6), (7) и (9) с полученными значениями V_{c1} по натурным данным, измеренным при спаде расходов, необходимо отметить, что фактическая неразмывающая скорость при $H = I$ м меньше, чем по расчетным формулам за счет морфологических образований дна в виде гряд. Следует иметь в виду, что значение предельной скорости, которое может быть получено в русле при возрастании расходов, будет больше значения V_{01}, полученного при уменьшении расходов воды.

Произведем сопоставление расчетных значений неразмываемых и допустимых скоростей по приведенным выше формулам. Допустим, что средняя глубина в крупном канале с расходом I000 $м^3/с$ будет равна $R = H = 9$ м. Средние скорости потока приводятся ниже.

Формула для определения скорости	(6)	(7)	(9)	(I0)
Численное значение скорости, м/с	0,624	0,666	0,74	I,05

Расчет по формуле (I0) дает явно завышенное значение средней скорости потока в условиях рассматриваемого канала.

Согласно формуле (9), превышение скорости по сравнению с формулой (7) примерно составит 20% (отношение скоростей по выражениям (9) и (7) примерно I,2). В последние годы среди специалистов сложилось мнение, правда пока не доказанное однозначно, что при таком соотношении между неразмывающей (непередвигающей) скоростью и допустимой (расчетной) канал сохраняет свою устойчивость.

Выводы

I. Для окончательного решения вопроса о предельных значениях скоростей течения (неразмывающей, размывающей, допустимой при ограниченном движении наносов) нужны дополнительные натурные данные, собранные по единой апробированной методике.

2. Настоятельно требуется внести ясность в терминологию и понятия, используемые при исследованиях и публикациях их результатов. Существующее в настоящее время резкое различие понятий в этом вопросе приводит к разночтению одних и тех же опытных данных. Заслуживают внимания терминология и понятия, использованные в / 2 /.

3. Следует улучшить приборное обеспечение натурных исследований. Во многих случаях измерения проводятся с помощью приборов и методик, имеющих недостаточную точность.

Литература

I. Абальянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л., Гидрометеоиздат, I98I.

2. Кадыров А.А., Бузунов И.А. К вопросу расчета неразмывающих скоростей. Сб. научных трудов САНИИРИ, вып. I58. Ташкент, I979.

3. Скрыльников В.А., Губина Т.Ю. К вопросу расчета устойчивых сечений крупных каналов в мелкопесчаных грунтах."Изв. АН УзССР", сер. техн.наук, I980, № I.

4. Справочник по мелиорации и гидротехнике, т Ш. М., Сельхозгиз, I945.

С.Х.АБАЛЬЯНЦ, докт.техн.наук
(Союзгипроводхоз)

ФОРМА РУСЛА ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

Вопрос устойчивости русл крупных каналов, проложенных в песках и супесях, имеет важное значение в связи с осуществ-

лением переброски стока. В целом он здесь не рассматривается, можно лишь отметить, что устойчивые русла отличаются, как правило, умеренным движением русловых наносов, количество которых соответствует транспортирующей способности потока.

Известные предложения о параметрах устойчивых русл в большинстве основаны или могут быть сведены к принципу минимума диссипации энергии потока. Основным его выражением могут служить известные формулы Линдлея, Лейси и других авторов для ширины потока / I, 3, 4, 5, 6, 8, I2, I4 /.

$$B \approx L Q^{z}. \qquad (I)$$

Численные значения коэффициента и показателя степени в правой части уравнения изменяются, согласно данным различных авторов, в пределах следующих средних значений:

$$L \approx 5{,}0\ ; \qquad z \approx 0{,}5.$$

Для определения средней глубины и других параметров потока пользуются различными способами.

Задача о форме поперечного сечения русла решается с привлечением данных об устойчивости грунта и обычно для одного частного случая без должного учета гидравлики потока. Рассматривается предельное равновесие поперечного сечения русла, т.е. случай, когда частицы грунта в любой его точке находятся в состоянии, предельном по началу подвижности. Это состояние разграничивает две области: малых скоростей, когда нет движения русловых наносов и русло можно рассматривать как недеформируемое, и больших скоростей, когда происходит движение наносов и устойчивость русла определяется уже другими факторами, связанными с этим движением. Предельное равновесие целесообразно при питании канала осветленной водой, ибо превышение скорости недопустимо во избежание размыва русла. Русло предельного равновесия используется и в случаях ограниченного движения наносов, хотя такое решение следует обосновать.

Одно из наиболее мотивированных решений задачи о русле предельного равновесия принадлежит Е.Лейну / I3 /. Оно основано на следующем предложении Форхгеймера (I9I3 г.): на частицы грунта, находящиеся на элементарной площадке русла, действует "влекущая сила" или условное напряжение от расположенного над ней элементарного столбца потока. Решение задачи приводит в

этом случае к форме русла в виде косинусоиды.

Наблюдения и опыты показывают, что в сечениях, построенных по косинусоиде, равная устойчивость приблизительно обеспечивается лишь при достаточно пологих откосах у уреза. Дело в том, что в отличие от принятого выше условия скорости течения, а следовательно и энергия потока довольно равномерно распределяются по ширине, снижаясь лишь с приближением к берегам.

На рис. I поперечного сечения крупного канала / 9 / ясно очерчены две приблизительно симметричные кольцевые системы изотах, что указывает на явное влияние береговых зон русла на режим течения. Подобное очертание изотах типично для большинства каналов, на которых в прошлые годы велись измерения экспедициями САНИИРИ.

Определяющим фактором распределения скоростей течения в русловом потоке являются крупномасштабные возмущения, возникающие вслед за основным течением / 2, 7, IO /. Согласно М.А.Великанову / 2 /, эти возмущения можно представить в виде вальцов, охватывающих толщу потока и катящихся со скольжением; их существование подтверждено многими наблюдениями. Изображенное на рис. I очертание изотах связано, по-видимому, с системой таких вальцов, формирующихся близ берега и движущихся под некоторым углом к основному течению. При этом легко объяснить расположение максимума скорости ниже поверхности: наружные слои вальцов, приторможенные у дна, вскоре оказываются на поверхности, не успев достичь скорости средней зоны.

Поскольку основные размеры потока опеределяются, как отмечено выше, его гидравликой, представляет интерес для выяснения формы русла режим скоростей в периферийной зоне. Расположение изотах предполагает, что изменение скоростей как по глубине до дна, так и по ширине до берега следует приблизительно одинаковой зависимости. Для проверки этого предположения сделана попытка определить параметры известной степенной зависимости изменения скорости по глубине, применив ее как для глубины, так и для ширины потока в его периферийной части

$$\frac{v}{v_{max}} = \left(\frac{h}{h_{max}}\right)^{\alpha_1}, \qquad \frac{v}{v_{max}} = \left(\frac{b}{b_{max}}\right)^{\alpha_2} \qquad (I)$$

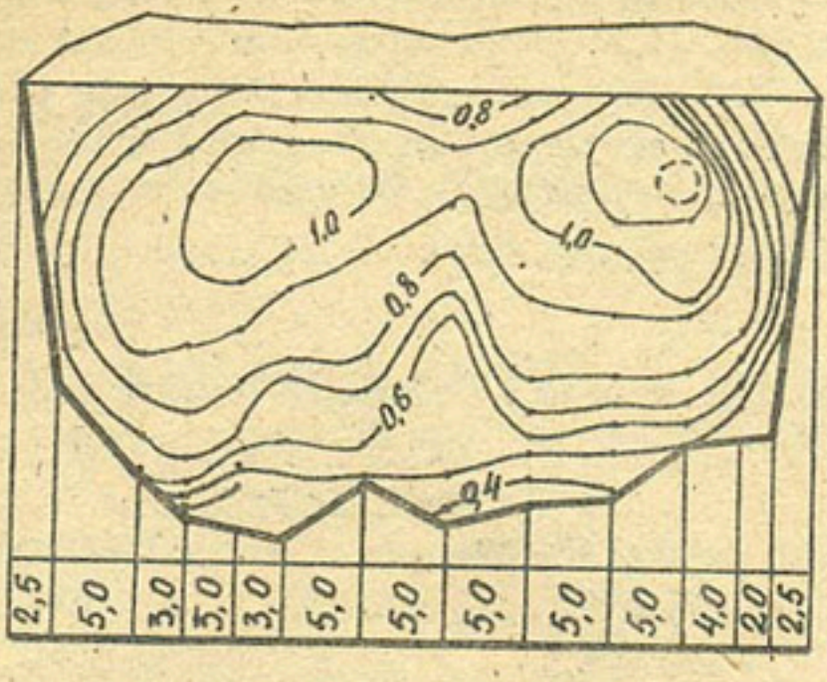


Рис. I. Изотахи в поперечном сечении оросительного канала: расход 9I $м^3/с$, средняя скорость 0,8 м/с. Вверху - эпюра средних по глубине скоростей.

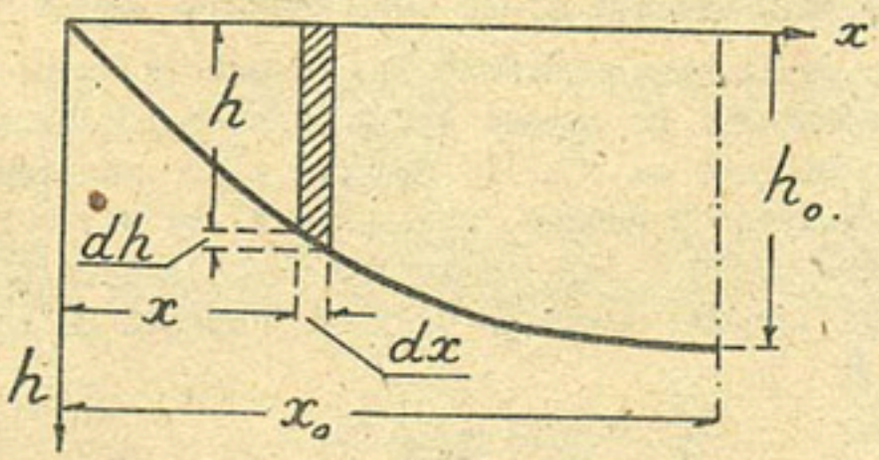


Рис.2. Схема к расчету формы устойчивого русла.

Подсчеты сделаны для двух объектов: створа канала, изображенного на рис. I, и створа на р. Каме, представленного Е.М.Минским / 7 /. Значения показателей степени осреднялись для правой и левой частей русла, а отсчеты производились от точек с наибольшими скоростями течения. Результаты приводятся в табл. I.

Таблица I

Показатели степени в степенной формуле скорости

Объект	Показатели степени по глубине: крайние	по глубине: средние	по ширине: крайние	по ширине: средние
Канал	0,40 - 0,24	0,32	0,37-0,26	0,32
Река	-	0,I82	-	0,I79

Подсчеты показывают сходство величин показателей степени по глубине и ширине. Что же касается его численного значения для каналов, то, согласно многим данным об изменении скорости по глубине в песчаных руслах грядового строения, средняя величина показателя степени может быть принята $\alpha = 0{,}25$.

Можно также предположить, что изменение скорости течения во всех вертикалях по ширине русла следует одинаковой зависимости, ибо изотахи на рис. I, близкие к окружностям, при неискаженном масштабе и ширине, превышающей глубину в десятки раз, представляют собой сильно вытянутые по горизонтали эллипсы. В этом случае получим значение средней скорости на вертикали с глубиной h

$$v_h = v_{h_0}\left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha}, \qquad (2)$$

где v_{h_0} - средняя скорость на вертикали с наибольшей глубиной h_0,

α - показатель степени формулы изменения скорости.

Определим теперь форму русла, следуя методу Форхгеймера-Лейна / I4 / с учетом поправок, вытекающих из реального распределения средней скорости в потоке (рис. 2). Условие равновесия частицы грунта, находящегося на откосе канала, выражается уравнением

$$G\cos\varphi\,tg\Theta=\sqrt{G\sin^2\varphi+a\tau_{h\varphi}^2}\,. \qquad (3)$$

где G – вес частицы,

φ – местный угол наклона откоса,

Θ – угол естественного откоса грунта во влажном состоянии,

a – эффективная площадь частицы,

$\tau_{h\varphi}$ – условное напряжение или "удельная влекущая сила".

Решая (3) относительно напряжения на откосе, получим

$$\tau_{h\varphi}=\frac{G}{a}\cos\varphi\,tg\Theta\sqrt{1-\frac{tg^2\varphi}{tg^2\Theta}} \qquad (4)$$

В пределе, при $\varphi=0;\ h=h_0$

$$\tau_{h_0}=\gamma h_0 i=\frac{G}{a}tg\Theta \qquad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$\tau_{h\varphi}=\tau_0\cos\varphi\sqrt{1-\frac{tg^2\varphi}{tg^2\Theta}} \qquad (6)$$

Напряжение на откосе при глубине h определяется как проекция на откос удельной влекущей силы от соответствующего столба жидкости, т.е.

$$\tau_{h\varphi}=\tau_h\cos\varphi=\gamma h_i\cos\varphi \qquad (7)$$

Приравнивая (7) и (6), получаем по Лейну

$$\frac{h}{h_0}=\sqrt{1-\frac{tg^2\varphi}{tg^2\Theta}} \qquad (8)$$

Интегрирование уравнения (8) с учетом того, что $tg\varphi = dh/dx$, приводит, как указывалось, к форме русла в виде косинусоиды, определяемой уравнением

$$h = h_0 \cos\left(\frac{tg\theta}{h_0} x\right), \qquad (9)$$

откуда ширина каждой из двух ветвей косинусоиды

$$x_0 = \frac{\pi h_0}{2 tg\theta} \qquad (10)$$

и площадь поперечного сечения косинусоиды

$$\omega = \frac{2 h_0^2}{tg\theta} \qquad (11)$$

В нашем же случае, согласно (2), динамические скорости при глубинах h и h_0 связаны уравнением

$$v_{*h} = v_{*h_0} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha} \qquad (12)$$

и соответствующие напряжения – уравнением

$$\tau_h = \rho v_{*h}^2 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{2\alpha} = \tau_{h_0} \left(\frac{h}{h_0}\right)^{2\alpha} \qquad (13)$$

Переход от горизонтальной площадки к наклонной примем, согласно (7), откуда из (I3) получим

$$\tau_{h\varphi} = \tau_{h_0} \cos\varphi \left(\frac{h}{h_0}\right)^{2\alpha} \qquad (14)$$

Приравнивая (I4) и (6), находим

$$\left(\frac{h}{h_0}\right)^{2\alpha} = \sqrt{1 - \frac{tg^2\varphi}{tg^2\theta}} \qquad (15)$$

Сравнивая (I5) и (8) можно видеть, что формула Лейна является частным случаем формулы (I5) при $\alpha = 0{,}5$.

Обозначив отношение h/h_0 через h_1, получим из формулы (I5), после преобразований и интегрирования следующие значения абсцисс кривой

$$x = \frac{1}{tg\theta} \int_0^{h_1} \frac{dh_1}{\sqrt{1 - h_1^{4\alpha}}} \qquad (16)$$

Для значения $tg\theta = 1$ абсциссы будут

$$x_1 = \int_0^{h_1} \frac{dh_1}{\sqrt{1 - h_1^{4\alpha}}} \qquad (I7)$$

Общая ширина периферийной кривой x_0 получится при верхнем пределе интеграла, равном единице. Интеграл (I7) решается путем суммирования.

В табл. 2 приведены координаты профиля периферийной области русла предельного равновесия, а также площадь ее живого сечения, согласно формуле (I7), для наиболее распространенного показателя степени изменения скорости по глубине и ширине $\alpha = 0{,}25$. Для определения абсцисс, ординат и площади живого сечения при заданных значениях наибольшей глубины h_0 и тангенса угла естественного откоса $tg\theta$ служат следующие выражения:

$$h = h_1 h_0 ; \qquad x = \frac{x_1 h_0}{tg\theta} ;$$

$$x_0 = \frac{x_{01} h_0}{tg\theta} ; \qquad \omega = k x_0 h_0 . \qquad (I8)$$

Таблица 2

Координаты формы русла в периферийной области по формуле (I7); $\alpha = 0{,}25$

h_1	x_1	h_1	x_1	h_1	x_1
0,0	0,000	0,5	0,588	0,95	I,55
0,I	0,I03	0,6	0,737	0,98	I,72
0,2	0,2I2	0,7	0,907	0,99	I,80
0,3	0,328	0,8	I,I08	I,000	2,00
0,4	0,452	0,9	I,372		

$x_{01} \approx 2{,}00$; $\omega_1 \approx I{,}33$; $k = \omega_1 : x_{01} \approx 0{,}67$

Форма русла, полученная описанным способом, характеризуется тем, что полнота ее живого сечения к = 0,65 приблизительно равна полноте сечения косинусоиды (0,64) и кривая по этому параметру близка к квадратичной параболе. Ширина же ее при равных условиях больше ширины косинусоиды на 30%.

Практическое применение полученных результатов представляется следующим образом: ширина русла, определенная из условий гидравлики потока по формуле вида Лейси или иной, сопоставляется с удвоенной шириной периферии русла, полученной с помощью таблицы 2 и формул (I8). Если первая ширина больше второй, то вводится горизонтальная вставка дна, вторая ширина принимается при условии, если она не более чем на 30–40% превышает первую, иначе чрезмерная первоначальная ширина русла может отрицательно повлиять на его устойчивость.

В изложенном методе расчета содержатся допущения: показатель степени в формуле скорости принят постоянным, не учтено грядовое строение русла, неизбежное в натуре в предельном режиме. Очевидно, однако, что форма устойчивого русла в реальных условиях должна значительно отличаться от косинусоиды.

Литература

I. Абальянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л., Гидрометеоиздат, I98I.

2. Великанов М.А. Русловой процесс. М., Изд.физ.-мат. л-ры, I958.

3. Каримов Р.М. Гидравлические устойчивые живые сечения. "Гидротехника и мелиорация", I967, № 6.

4. Лаптурев Н.В. О расчете устойчивых русл каналов. "Гидротехника и мелиорация", I969, № I0.

5. Левановский Л.Б. Устойчивые формы русл каналов. Исследования деформаций каналов и влияния орошения на грунтовые воды. М., I956.

6. Лелявский С. Введение в ручную гидравлику. Перевод с англ. Л., Гидрометеоиздат, 1961.

7. Минский Е.М. Турбулентность руслового потока. Л., Гидрометеоиздат, 1952.

8. Технические указания по проектированию каналов оросительных систем. Минсельхоз СССР, М., 1955.

9. Троицкий А.В. К вопросу о форме гидравлически устойчивых каналов. В сб. "Вопросы гидротехники", вып. I, АН УзССР, Ташкент, 1963.

10. Фидман Б.А. Некоторые экспериментальные данные о крупномасштабной турбулентности в открытом потоке. „Изв. АН СССР", сер.геофиз., т.14, № 3, 1950.

11. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. Перевод с англ. М., Изд-во литературы по строительству, 1969.

А.А.КАДЫРОВ, канд.техн.наук
В.И.БУЛАНКИН

УЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ (ПРОЧНОСТИ) МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ КАНАЛОВ

Устойчивый гидравлический и русловой режимы земляных каналов формируются не сразу. Стабилизация русла происходит с течением времени под воздействием различного рода факторов, влияние которых не всегда учитывается при проектировании. Поэтому установившиеся морфометрические характеристики русл и гидравлические элементы течения в каналах нередко существенно отличаются от проектных.

Так, скорости течения в крупных каналах оросительных систем Южного Хорезма (Ташсака, Шават) и КК АССР (Кызкеткен, канал им.В.И.Ленина), русла которых проложены в собственных отложениях наносов р.Амударьи (древних и современных), существенно (в полтора, два раза и более) превышают скорости начала подвижки влекомых мелкопесчаных наносов. Характерная особенность условий эксплуатации этих каналов - функционирование в течение 3–4 мес. в году при насыщениях потока наносами по преимуществу взвешиваемых фракций, близких к критическим.

Можно полагать, что слой влекомых наносов прикрывает, защищает коренной грунт дна от непосредственного воздействия потока. Однако вопрос о причинах сохранения плановой устойчивости русл остается открытым.

В последние годы в действие вводится все больше машинных каналов, а также каналов, питаемых осветленной водой русловых и наливных водохранилищ. Стабилизация русла при скоростях течения $u > u_{\infty}$ характерна и для таких каналов. Так, Каракумский канал им.В.И.Ленина на участке трассы 100–300 км, пролегающий преимущественно в барханных песках и легких супесях и питаемый осветленной водой Келифских озер (представляющих отстойный бассейн с высокой степенью осветления потока), после завершения в 1975 г. третьей очереди работ по спрямлению и расширению сохраняет постоянство плановых и высотных отметок русла при скоростях течения, превышающих в среднем в 1,5 раза и более

скорости начала подвижки влекомых наносов. На этом участке отмечается также происходящее из года в год существенное сокращение потерь воды на фильтрацию из канала.

В 1972-1974 гг. отделом эксплуатации оросительных систем в САНИИРИ под руководством И.И.Горошкова была разработана широкая программа исследований с целью выявления факторов, влияющих на сокращение потерь воды из необлицованных каналов.

Объектом исследования была Ульяновская ветвь Каршинского канала, которую по грунтовым условиям (барханные пески) и наносному режиму (осветленная вода р.Амударьи) можно было рассматривать как аналог Каракумского канала.

В результате исследований В.С.Хачикянц /13/ пришел к выводу о том, что определяющими факторами сокращения потерь на фильтрацию являются образование слоя наилка на поверхности дна и откосов, а также уплотнение и кольматация поверхностного слоя грунта русла. Одновременно было отмечено повышение устойчивости русла против размыва под влиянием тех же факторов. Опыт увеличения пропускной способности русла канала Кызкеткен методом саморазмыва в основном подтвердил эти выводы: в результате размыва русла путем пропуска форсированных расходов воды (в 1,5÷2 раза превышающих проектные) потери на фильтрацию из канала резко возросли (данные Н.Бекимбетова, К.Байманова). Через 1-2 года после окончания работ КПД канала вновь достиг прежнего уровня. В настоящее время он сохраняет устойчивость плановых и высотных отметок русла при скоростях течения, более чем в два раза превышающих величины "неразмывающих" скоростей, и насыщениях наносами существенно меньше критических.

К сожалению, исследования факторов, оказывающих определяющее влияние на стабилизацию русл и сокращение потерь воды из каналов, не были завершены. Эту проблему, по-видимому, можно решить лишь на базе комплексных исследований механизмов динамического воздействия наносонесущего потока на деформируемое русло и сопротивления русла динамическому воздействию потока.

Существующие концепции руслоформирующих процессов не объясняют многообразия факторов в их взаимосвязи и взаимодействии, которые оказывают определяющее влияние на формирование устойчивых земляных русл каналов. Поэтому поиск новых решений,

более полно отражающих физическую природу процессов и явлений, связанных с формированием устойчивых русл, – чрезвычайно актуальная задача в свете осуществляемой ныне широкой программы межрегионального перераспределения речного стока.

Ниже делается попытка осмыслить механизм взаимодействия наносонесущего потока с деформируемым руслом земляного канала.

Рассмотрим составляющие сопротивления сдвигу мелкозернистого водонасыщенного грунта в свете современных представлений механики грунтов /4,8,10/.

Н.Н.Маслов /10/ выделяет такие составляющие (обозначения наши):

$$\tau_{ср} = \Delta\tau(g) + \Delta\tau(\mathcal{E}) + \tau(c). \qquad (1)$$

<u>Первое слагаемое</u> характеризует составляющую сопротивления трения, возникающего под влиянием собственного веса частицы в виде

$$\Delta\tau_{ср} = K_d\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)\cdot d \qquad (2)$$

где γ_s и γ – удельный вес грунта и воды соответственно;
K_d – опытная постоянная.

Таким образом, влияние данной составляющей сопротивления возрастает прямо пропорционально крупности частиц грунта d.

<u>Второе слагаемое</u> характеризует составляющую сопротивления, обусловленную влиянием водноколлоидных (обратимых) связей между частицами грунта

$$\Delta\tau_\varepsilon = \mathcal{E}_f\,\tau_\varepsilon \qquad 3)$$

здесь τ_ε – сопротивление сдвигу, обусловленное влиянием электрохимических, Ван-дер-Ваальсовых сил (водноколлоидных связей), действующих между частицами, если расстояние между ними не превышает некоторого предела $l \ll d$;

$\mathcal{E}_f$ – коэффициент пропорциональности.

Для системы вода – песчаный грунт можно принять $l \approx const$. Покажем, что влияние данной составляющей сопротивления при прочих равных условиях возрастает обратно пропорционально крупности частиц d.

Для совокупности частиц со средним диаметром d величина коэффициента пропорциональности $\mathcal{E}_f$ определяется как отношение суммарной площади N независимых контактных поверхностей данной частицы поверхностного слоя грунта с другими $S_\varepsilon N$ к площади поверхности частицы, приведенной к форме шара $S_ш$ (рис.I)

$$\mathcal{E}_f = \frac{S_\varepsilon N}{S_ш} = \frac{\pi d l N}{\pi d^2} = \frac{l N}{d} \qquad (4)$$

Таким образом, имеем

$$\Delta \tau_{ср}(\varepsilon) = \frac{l N \tau_\varepsilon}{d} = \frac{B_1}{d} \cdot КГС/м^2 \qquad (5)$$
$$(B_1 = l N \tau_\varepsilon)$$

(значение N в общем случае зависит от пористости грунта и при $d = const$ колеблется в пределах $N = 3 \div 6$).

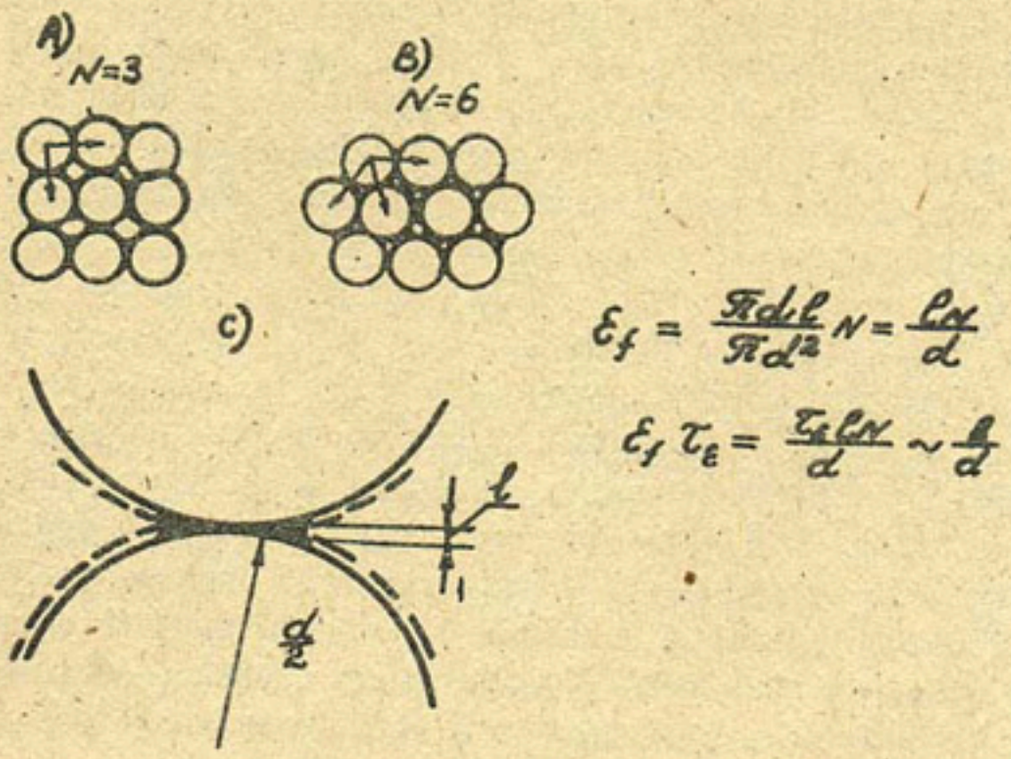


Рис.I. Схема формирования водноколлоидных (обратимых) связей между частицами водонасыщенного грунта: а – неплотная укладка частиц; б – плотная укладка частиц; с – к расчету площади контактной поверхности между двумя смежными частицами диаметром d, в пределах которой проявляется действие водноколлоидных связей.

Третье слагаемое характеризует составляющую сопротивления, обусловленную влиянием межатомных сил жесткого структурного сцепления (цементационных, необратимых связей). Величина их практически не зависит от крупности грунта

$$\Delta \tilde{\tau}_3(c) = C_f \tilde{\tau}_c \approx C_1 \quad кгс/м^2 \qquad (6)$$

где $\tilde{\tau}_c$ – сопротивление сдвигу, обусловленное влиянием сил жесткого структурного сцепления;

C_f – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, имеем

$$\tilde{\tau}_{ср} = K_d (\gamma_s - \gamma) d + \frac{\ell N \tilde{\tau}_E}{d} + C_f \tilde{\tau}_c \text{ , кгс/м}^2 \qquad (7)$$

или в более общем виде

$$\tilde{\tau}_{ср} = a^2 d + \frac{\beta_1}{d} + C_1 \qquad кгс/м^2$$

До недавнего времени предполагалось, что силы жесткого структурного сцепления $C_f \tau_c$ заметно проявляются только в связных грунтах. Н.Я.Денисов /8/ теоретически и экспериментально доказал, что эти силы возникают и в первоначально несвязных мелкопесчаных грунтах с различной степенью водонасыщения при содержании глинистых, не превышающем I%. Влияние сцепления заметно проявляется уж через I0–I5 дней после замочки грунта. В течение длительного эксперимента (5,5 лет) показатели прочности опытных образцов (модуль деформации E, кгс/м^2; сопротивление сдвигу τ, кгс/м^2, число ударов молота для погружения зонда пенетрометра в испытуемый грунт) возросли в среднем в 2–3 раза.

По мнению Н.Я.Денисова, под воздействием электрохимических процессов вокруг зерен водонасыщенного грунта образуется слой кремниевой кислоты, который с течением времени сначала образует вокруг частиц желеобразную массу (гель), а затем затвердевает, образуя структурные связи (хотя и сравнительно слабые) между зернами.

Поток в открытом русле всегда (хотя бы в ограниченных количествах) несет влекомые и взвешенные наносы, в том числе коллоидальные глинистые и органические взвеси, поступающие от источника питания, а также в результате плоскостного смыва, ветровой эрозии и местных деформаций русла.

Воздействие транспорта влекомых и взвешенных наносов на формирование устойчивого русла двояко. Во-первых, слой влекомых

наносов прикрывает подстилающий грунт от непосредственного воздействия напряжений сдвига, возникающих на границе поток-русло /2,6 и др./; во-вторых, русло тем устойчивее, чем больше поток транспортирует коллоидальной, глинистой и органической взвеси /3,12,14 и др./.

По-видимому, предложения по количественному учету влияния последнего фактора впервые были опубликованы Е.Лейном.

Наличие пылеватых глинистых и органических частиц в естественных (например, барханных) песках, а также проникновение в толщу подстилающего слоя глинистых, содержащихся в воде, стимулирует процесс формирования в этом неподвижном слое (лежащем ниже подвижного слоя влекомых наносов) сил жесткого структурного сцепления: глинистые адсорбируются вокруг песчаных зерен и застуденевают, а затем затвердевают, склеивая зерна между собою. Величины формируемых при этом сил жесткого структурного сцепления в среднем на порядок и более превышают силы сцепления, характерные для чистых песков (без примеси глинистых).

Процесс формирования сил жесткого структурного сцепления начинается с момента замочки грунта и продолжается в течение 2÷5 лет. Таким образом, составляющую сопротивления $C_f\,\tilde{\tau}_c$ (или C_I) в общем случае следует рассматривать как функцию времени и условий работы (наносного режима) каналов: $C_i = C_i\,(S,t)$

Из сказанного выше можно заключить, что допустимая величина интегральной характеристики напряжения сдвига на границе поток – русло $\tilde{\tau}_{od} = f\,H_{cp}\,i$ должна определяться как функция $\tilde{\tau}_{гр}$ и прогнозируемых условий работы (наносного режима) каналов.

В общем случае имеем

$$\tilde{\tau}_{od} = f(S)\,\varphi\,\tilde{\tau}_{гр}, \qquad (8)$$

здесь $f(S)$ – функция, учитывающая влияние транспорта влекомых наносов на величину $\tilde{\tau}_{od}$;

φ – коэффициент пропорциональности, устанавливающий связь между характеристиками напряжения сдвига $\tilde{\tau}_{od}$ и сопротивления грунта русла $\tilde{\tau}_{гр}$.

Функции влияния транспорта влекомых и взвешанных наносов удобно придать такой вид

$$\left.\begin{aligned} f(S) &= (1+K_S)^2 \\ K_S &= f_1(S/S_{кр}) \\ 0 &< S/S_{кр} < 1 \end{aligned}\right\}, \qquad (9)$$

где

$S = \frac{Q_s}{Q}\ \frac{кгс}{м^3}$ – соотношение расходов твердой и жидкой фаз руслового потока;

$S_{кр}$ – транспортирующая способность потока.

В этом случае очевидно, что

$$0 < f_1(S) < 1 \quad и \quad 1 < f(S) < 4$$

Подставив (7а) и (9) в (8), получим

$$\tau_{об} = (1+K_s)^2 \cdot \varphi\left[a^2 d + \frac{\beta_1}{d} + c_1(S,t)\right] \qquad (10)$$

На современном уровне развития русловой гидравлики и техники измерений значения опытных постоянных K_s, φ, a^2, β, и $c_1(t)$ могут быть найдены только на основе эксперимента.

Задачу хотя бы приближенной количественной оценки влияния каждого из перечисленных выше факторов на величину $\tau_{об}$ решим методом исключения, использовав для этой цели в комплексе а) результаты исследований В.С.Кнороза /9/ и Н.Я.Денисова /8/ (чистые пески); б) многолетние данные натурных измерений на устойчивых песчаных участках крупных каналов и рек с различным наносным режимом (рис. 2), в) рекомендации Е.Лейна /14/ по учету влияния условий работы (наносного режима) каналов (табл. 2).

В опытах В.С.Кнороза /9/ движение влекомых наносов исключается, т.е. $K_S = 0$ и $f(S) = 1$. В области значений $d \geqslant 1$ мм функциональная связь $\tau_{ос} = f(d)$ близка к линейной. Это дает основание принять

$$a^2 d \gg \frac{\beta_1}{d} + c_1(T)$$

$$\tau_{ос} \approx \varphi(a^2 d).$$

Для значений $d \geq$ I мм им получено $\varphi = 0{,}026$.

Полагая теперь $\varphi = 0{,}026 = const$, действительным для всей области значений $0{,}05 < d <$ I00 мм, запишем

$$\tau_{oc} = 0{,}026 \left[a^2 d + \frac{b}{d} + c_1(T), \right], \qquad \text{(I0а)}$$

где

$c(T)$ – состояние грунта, при котором полностью завершилось формирование сил жесткого структурного сцепления.

В дальнейшем для удобства выполним такие преобразования:

$$\tau_{oc} = 0{,}026 \cdot \frac{a^2}{1000} \left[d + \frac{\beta}{d} + c(T) \right], \qquad \text{(I0б)}$$

где $\beta = \frac{b_1 \cdot 1000}{a^2}$; $c(T) = \frac{c_1(T) \cdot 1000}{a^2}$,

$a^2 = 1650$ кгс/м^3 и d мм.

Затем с учетом этого получим

$$\tau_{oc} = 0{,}042 \left[d + \frac{\beta}{d} + c(T) \right] \text{ кгс/м}^2; d \text{ мм} \qquad \text{(I0в)}$$

Остается теперь оценить значения постоянных β и $c(T)$.

По В.С.Кнорозу /9/, в гладкой области обтекания ($d <$ 0,25 мм) влияние диаметра на "неразмывающую" скорость быстро падает /5, с.I97/.

Исходя из рассматриваемой здесь теории существует такая крупность $0 < d_{кр} < 0{,}25$ мм, при которой влияние составляющей сопротивления трения $\Delta \tau_{гр}(g)$ уравновешивается влиянием составляющей сопротивления, возникающей под воздействием водноколлоидных связей $\Delta \tau_{гр}(\delta)$

$$K_g(\gamma_s - \gamma) d_{кр} - \frac{\ell N \tau_\varepsilon}{d_{кр}} \approx 0 \qquad \text{(II)}$$

или для системы вода – песчаный грунт

$$d_{кр} - \frac{\beta}{d_{кр}} = 0 \qquad \text{(IIа)}$$

Е.И.Масс /II/ опытным путем установил, что при $d \gtrsim$ 0,I мм сопротивление сдвигу песчаного грунта возрастает. Это дает основание принять $d_{кр} = 0{,}I$ мм.

Подстановка $d_{кр}$ в (IIа) дает $\delta = 0{,}01$.

Каждой из серии опытов В.С.Кнороза по определению $\tau_{ос} = f(d)$ предшествовала достаточно длительная замочка испытуемого грунта, а сами опыты выполнялись без нарушения его структуры в течение времени, достаточного для образования сил жесткого структурного сцепления. Опираясь на приведенные выше результаты опытов Н.Я.Денисова, можно принять, что под влиянием сил сцепления сопротивление сдвигу для грунта с крупностью $d_{кр}$ возрастает в среднем вдвое, т.е.

$$c(\tau) \approx d_{кр} + \frac{\delta}{d_{кр}} = 0{,}1 + \frac{0{,}01}{0{,}1} = 0{,}2$$

Таким образом, имеем

$$\tau_{ос} = 0{,}042\left(d + \frac{0.01}{d} + 0{,}2\right), \quad кгс/м^2 \qquad (I2)$$

$(d\ мм)$

Кривая $\tau_{ос} = f(d)$ при найденных опытных постоянных дает значения, близкие к полученным в опытах В.С. Кнороза во всем диапазоне крупностей грунта $0{,}25 < d < 100$ мм (табл. I и рис. 2, кривая I).

Таким образом, полученный результат можно рассматривать как подтверждение изложенных выше соображений о механизме и определяющих факторах сопротивления сдвигу мелкопесчаных водонасыщенных грунтов.

Обратимся теперь к оценке допустимой величины $\tau_{од}$ при расчете каналов в песчаных грунтах с учетом влияния транспорта влекомых и коллоидальных взвешенных наносов.

На рис. 2 в координатах ($\tau_{од}$, d) нанесены осредненные за многолетний период данные измерений $\tau_{од}$, выполненных на устойчивых участках рек и каналов в мелкопесчаных руслах с различным наносным режимом (всего более 1000 измерений). В области значений $0{,}05 < d < 1$ мм они образуют "облако" точек. Этот факт свидетельствует о том, что в данном случае крупность грунта нельзя рассматривать как определяющий фактор сопротивления динамическому воздействию потока. Кроме того, необходимо учитывать условия работы (наносный режим) каналов. В связи с этим для анали-

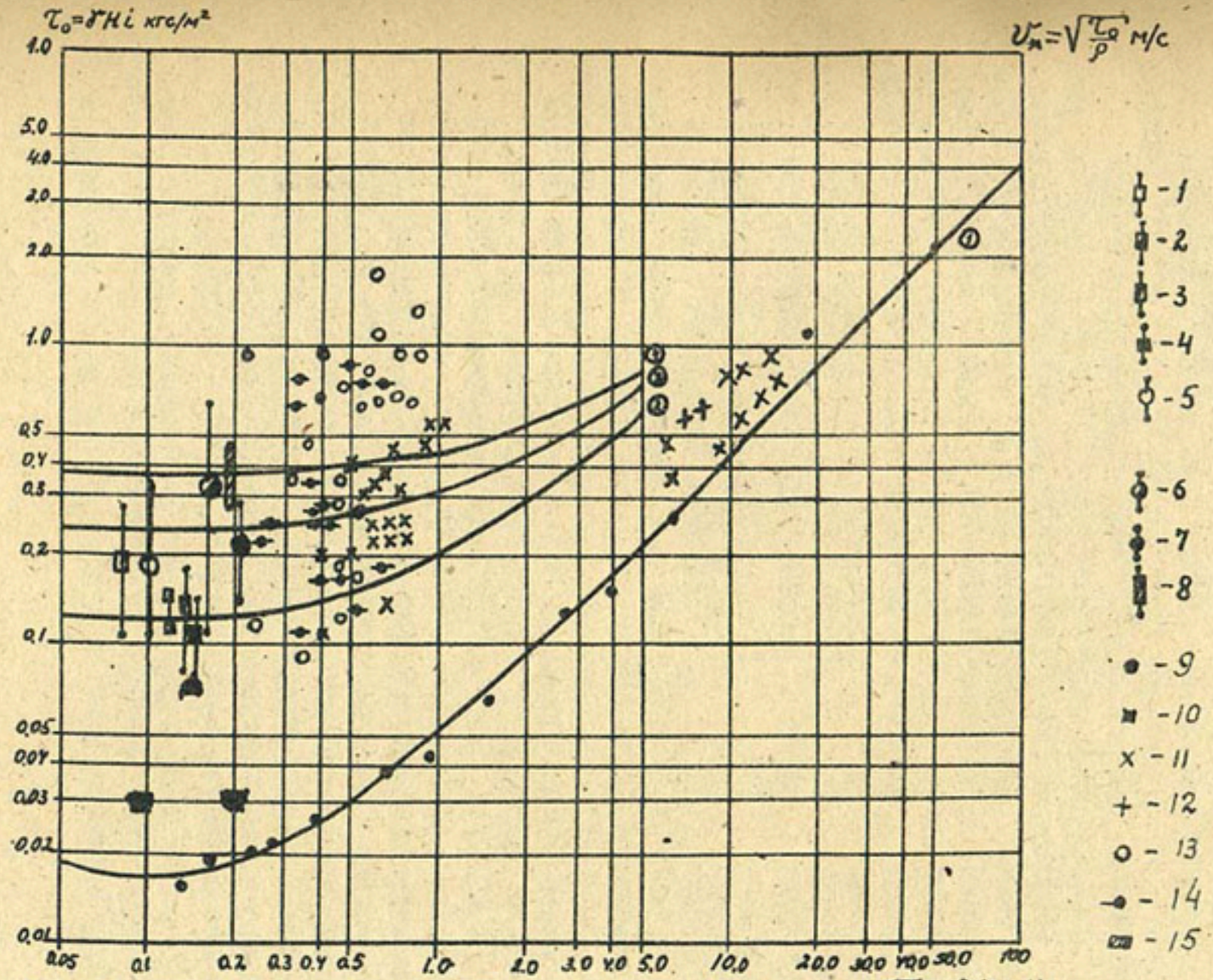


Рис.2. Обобщенные данные лабораторных и натурных измерений $\tau_0 = f(S, d)$:

I–4-Каракумский канал; 5- Кызылкумский канал; 6–7 Кызкеткен, Шават, Ташсака, Амубухарский канал; 8 – индо-пакистанские каналы; 9–опыты В.С.Кнороза; IO–измерения З.Н.Нуритдинова; II–I4 – реки. I – по формуле (I2); (2)–(4) – по формулам (I3)–(I5).

Таблица I

Сопоставление опытных данных В.С.Кнороза по определению характеристики напряжения сдвига τ_{oc}, отвечающей началу подвижки несвязного грунта с расчетом по формуле (I2)

d, мм	γ_s, кгс/м³	Кол-во опытов	H, м	τ_{oc}, кгс/м² измерен.	τ_{oc}, кгс/м² расчет по (I2)
I8,4	2630	24	0,065÷0,I96	I,I2	0,780
6,4	2620	35	0,070÷0,273	0,26	0,277
4,0	2630	78	0,052÷0,I36	0,I50	0,I76
2,85	2620	47	0,070÷0,457	0,I30	0,I28
I,48	2670	74	0,046÷0,6I5	0,0640	0,07I3
0,94	2650	24	0,09I÷0,460	0,0420	0,0485
0,67	2640	52	0,028÷0,750	0,0375	0,0373
0,38	2640	68	0,044÷0,750	0,0255	0,0255
0,26[x]	2650	9	0,090÷0,074	0,0220	0,0220
0,23[x]	2650	II	0,069÷0,I95	0,0203	0,0I99
0,I64	2650	I00	0,050÷0,787	0,0I92	0,0I78
0,I30[x]	2650	8	0,05I÷0,I9I	0,0I54	0,0I7I
		Всего: 530			

x) данные М.Р.Карапетян.

за целесообразно обратиться к рекомендациям Е.Лейна (табл.2 и рис. 2, кривые 2, 3 и 4). Из рис. 2 видно, что кривая 2 $\tau_{od} = f(S, d)$ для "чистой воды" представляет собой среднюю линию, определяющую значения τ_{od}, полученные по результатам многолетних данных измерений на устойчивых участках каналов в песчаных руслах, функционирующих при ограниченном транспорте влекомых и взвешенных наносов (наносы не поступают из источника питания с водой, твердый сток формируется за счет поступления в канал эоловых песков, продуктов плоскостного смыва и местных размывов русла),

$$0 < S \ll S_{кр} .$$

Кривая 2 (рис. 2) описывается таким уравнением:

$$\tau_{od} = 0{,}1\left(d + \frac{0{,}01}{d} + 1\right), \qquad (13)$$

Здесь

$K_S = 0{,}55$ и $(1 + K_S)^2 = 2{,}4$. d мм.

Значение $C(S,T)$ в пять раз превосходит соответствующее значение, установленное из опытов В.С.Кнороза для однородных по крупности, чистых, без примеси глинн, песков.

Кривая 3 представляет собой среднюю линию, определяющую значения $\tau_{od} = f(S,d)$, характерные для каналов в песчаных руслах, функционирующих при насыщениях наносами, близких к критическим (твердый сток формируется главным образом за счет влекомых и взвешенных наносов, поступающих из источников питания с водой: $0 \leq S \leq S_{kp}$). Это преимущественно "старые каналы" бассейнов р. Амударьи и Сырдарьи.

Кривая 3 описывается уравнением

$$\tau_{od} = 0{,}1\left(d + \frac{0{,}01}{d} + 2{,}2\right), \quad \text{кгс/м}^2 \qquad (14)$$

(d мм)

Кривая 4 определяет значения $\tau_{od} = f(d,S)$, характерные для участков каналов с песчаным дном и откосами из связных грунтов (супесь, суглинок, глина) или с частичным закреплением живого сечения. Она описывается уравнением

$$\tau_{od} = 0{,}1\left(d + \frac{0{,}01}{d} + 3{,}5\right), \quad \text{кгс/м}^2 \qquad (15)$$

(d мм)

Приведенные выше оценки составляющих сопротивления сдвигу грунта русла безусловно носят приближенный характер (как и другие широкоизвестные предложения по расчету допустимой скорости течения или характеристики напряжения сдвига τ_{od} в необлицованных каналах). Несмотря на это, формулы (13–15) для оценки τ_{od}, полученные с учетом многолетних данных натурных измерений на устойчивых участках каналов в песчаных руслах с различным наносным режимом, могут быть рекомендованы для расчета каналов в песчаных руслах с круп-

ностью грунта $0{,}05 < d < 1$ мм. При этом необходимо подчеркнуть, что значения $\tau_{od}(S,T)$, вычисленные по этим формулам, отвечают условиям установившейся нормальной эксплуатации каналов и, следовательно, при проектировании должны быть предусмотрены меры по предупреждению деформаций русл в течение начального периода эксплуатации каналов.

"Доля" каждой из составляющих сопротивления от суммарной величины τ_{od}, определяемой по формулам (I2-I5), показана на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что даже в опытах В.С.Кнороза с чистой водой (рис. 3, а) и однородными по крупности песками, отмытыми от глинистых включений, в интервале крупностей грунта $0{,}05 < d < 0{,}2$ мм "доля" составляющих сопротивления, обусловленных влиянием водноколлоидных связей и сил жесткого структурного сцепления, существенно превышает "долю" от суммарной величины сопротивления составляющей, обусловленной влиянием собственного веса частиц в воде.

В естественных водотоках, транспортирующих глинистые и органические коллоиды, даже при ограниченных насыщениях потока песчаными наносами ($0 < S \ll S_{kp}$) в том же интервале крупностей доля составляющей сопротивления, обусловленной влиянием собственного веса частиц в воде, не превышает 5÷I5%. Того же порядка и доля составляющей сопротивления, обусловленной влиянием водноколлоидных связей (рис. 3, б).

Наконец, при насыщениях наносами преимущественно взвешиваемых фракций, близких к критическим ($0 < S \gtrsim S_{kp}$), определяющая роль в формировании устойчивого русла принадлежит транспорту наносов (рис. 3, г). По-видимому, именно этим объясняется тот факт, что в Средней Азии наибольшее распространение получил расчет каналов по методу "допустимых скоростей" /2/.

Исходя из сказанного, предлагается следующая концепция руслоформирующих процессов, протекающих в крупных каналах.

Следуя В С.Алтунину /I/, необходимо различать начальный (переходный) и период установившейся нормальной эксплу-

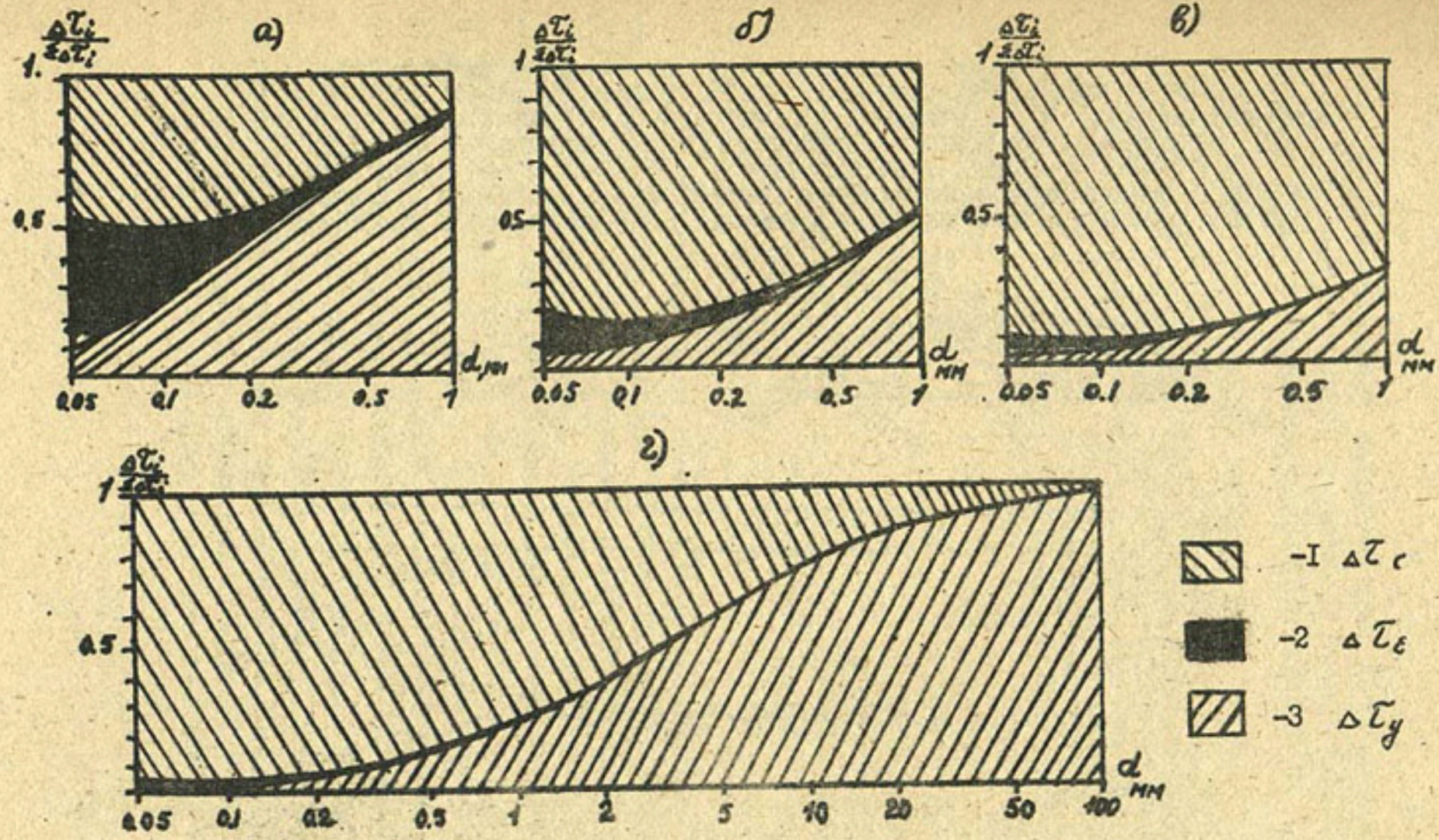


Рис. 3. "Веса" составляющих сопротивления сдвигу $\Delta\tau_i/\Sigma\Delta\tau_i$: а) при расчете по формуле (I2);б) и г)по формулам (I3-I5): I - составляющая сил жесткого структурного сцепления; 2 - составляющая водноколлоидных (обратимых) связей; 3 - составляющая сил трения, обусловленных влиянием собственного веса частиц в воде.

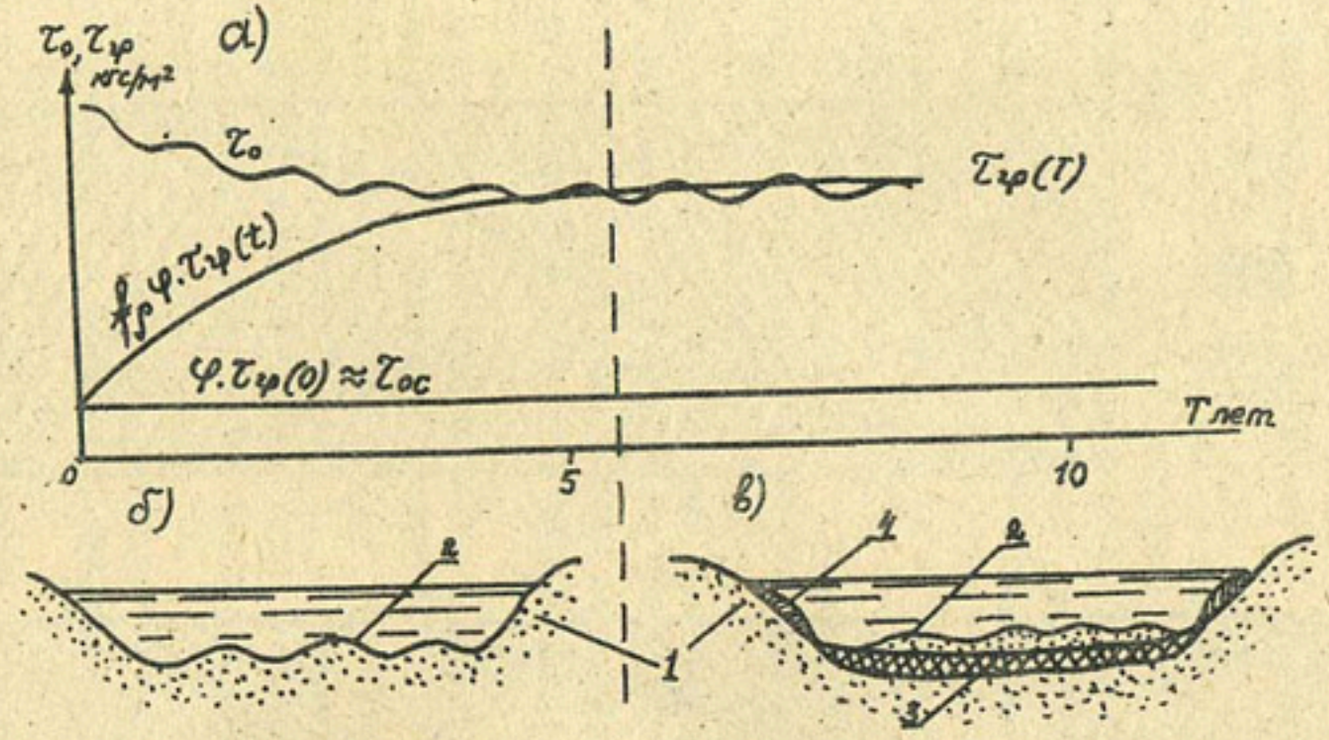


Рис. 4. Общая схема руслоформирующих процессов, протекающих в крупных каналах: а) динамика взаимного регулирования характеристик напряжения сдвигу на границе поток-русло $\tilde{\tau}_0 = \gamma H_{cp} i$ и сопротивления грунта $\tilde{\tau}_{\varphi} = f(S, d)$; б) структура мелкопесчаного грунта русла в начальный (переходный) период; в) то же, в период установившейся нормальной эксплуатации каналов: 1 – песчаное русло (коренной грунт), 2 – песчаные наносы (гряды), 3 – подстилающий слой грунта, 4 – отложение наилка.

атации каналов в руслах, сложенных мелкозернистыми несвязными и малосвязными грунтами.

Таблица 2

Допустимые касательные напряжения для каналов в средне- и мелкозернистых грунтах по Лейну и рекомендуемые с учетом опыта эксплуатации каналов Средней Азии

d, мм	$\tau_{од}$, кгс/м^3					
	чистая вода (Лейн)	$0 < S \ll S_{кр}$ по (13)	небольшое содержание мелкой взвеси (по Лейну)	при поступлении наносов из источника питания с водой $0 < S \gtrless S_{кр}$ по (14)	большое содержание мелкой взвеси (по Лейну)	каналы с песчаным дном и закрепленными откосами ($0 < S \gtrless S_{кр}$) по (15)
0,1	0,120	0,120	0,240	0,240	0,370	0,370
0,2	0,130	0,125	0,250	0,245	0,350	0,375
0,5	0,150	0,152	0,270	0,272	0,400	0,402
1,0	0,200	0,201	0,290	0,321	0,440	0,451
2,0	0,290	0,300	0,390	0,421	0,540	0,550
5,0	0,680	0,600	0,800	0,720	0,900	0,850

В течение переходного периода (от двух до нескольких лет) поток вырабатывает такую форму рельефа русла, которая в наибольшей степени отвечает условиям устойчивости кинематической структуры скоростного поля и пропускной способности по твердой фазе. Кроме того, под влиянием транспорта влекомых и коллоидальных взвешенных наносов, всегда (хотя бы в ограниченных количествах) имеющих место в открытых потоках, происходит формирование сцементированного глинистыми включениями подстилающего слоя грунта (лежащего ниже слоя влекомых наносов). В результате сопротивление сдвигу грунта русла экспоненциально возрастает, стремясь к некоторому пределу, величина которого существенно зависит от условий работы канала (наносного режима и состава наносов в коллоидном диапазоне) /7/.

Таким образом, устойчивое русло канала формируется,

как продукт взаимного регулирования характеристики напряжения сдвига, приложенного к руслу со стороны наносонесущего потока $\tau_{od}(t)$, с одной стороны, и сопротивления сдвигу грунта русла $\tau_{\phi}(s,t)$, с другой –

$$\tau_{od} \rightleftharpoons \varphi\, \tau_{\phi}(s,t). \qquad (16)$$

Общая схема руслоформирующих процессов, протекающих в крупных каналах показана на рис. 4 (кривая $\tau_{od}=f(t)$), построена по результатам многолетних наблюдений Туркменниигим за русловым режимом 210–310 км Каракумского канала).

Главная цель предлагаемой работы – показать физическую природу механизма и определяющие факторы сопротивления мелкозернистых несвязных и малосвязных грунтов динамическому воздействию наносонесущего потока и, таким образом, определить направления дальнейших исследований в этой области. Наиболее актуальными представляются исследования динамики изменения прочностных характеристик первоначально несвязных (или малосвязных) грунтов русл под воздействием наносонесущего потока с целью обоснования выбора оптимальных значений τ_{od} и схем (технологии) ввода каналов в эксплуатацию.

Литература

1. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М., "Колос", 1979.
2. Абальянц С.Х. Гидравлические сопротивления в земляных каналах. Труды САНИИРИ, вып. 108, Ташкент, 1980.
3. Беркович К.М. Влияние устойчивости ложа на интенсивность деформаций русла Средней Оби и Амударьи. В кн. "Эрозия почв и русловые процессы", вып. 1. М., 1970.

4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М., ВШ, 1979.
5. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л., ГМИ, 1979.
6. Гостунский А.Н. Устойчивое русло. В сб. "Вопросы гидротехники", вып.1. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1955.
7. Гринсмит Дж. Петрология осадочных пород. М., "Мир", 1981.
8. Денисов Н.Я. Природа прочности и деформации грунтов. М., Стройиздат, 1972.
9. Кнороз В.С. Неразмывающие скорости для несвязных грунтов и факторы их определяющие. Изд. ВНИИГ, т. 59, 1958.
10. Маслов Н.И. Условия устойчивости водонасыщенных песков. М.-Л., Госэнергоиздат, 1959.
11. Масс Е.И. О допускаемых (неразмывающих) скоростях волнового потока. Тр. ГрузНИИГиМ, вып. 25, 1967.
12. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русл и методика оценки их устойчивости. М., "Колос", 1967.
13. Хачикянц В.С. К вопросу об использовании взвешенных наносов в каналах для снижения фильтрации. Тр. САНИИРИ, вып. 157, Ташкент, 1978.
14. Lane E.W. Progress report resuets of studies on desight of stabll chanhels, U.S. Bureau of Reclamation Hidraulic Laboratory Report, N Hyg-352 June.

В.А.СКРЫЛЬНИКОВ, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЛ КРУПНЫХ КАНАЛОВ В МЕЛКОПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

Надежность проектирования гидротехнических сооружений обеспечивается в настоящее время проведением специальных лабораторных исследований на различных моделях. Круг вопросов, требующих лабораторного обоснования, настолько широк, что разработать единую методику моделирования практически не представляется возможным. Наиболее сложными вопросами являются те, которые требуют исследования на размываемых моделях, и разработка точной методики моделирования для них практически невозможна, так как нельзя выдержать одновременно числа Фруда, Рейнольдса, Сърухаля, Эйлера. Некоторые из известных чисел дают противоречивый результат. Так, по Фруду масштаб скорости $\alpha_v = \sqrt{\alpha_h}$, а по Рейнольдсу $\alpha_v = \frac{1}{\alpha_h}$ / I /. Невозможно выдержать на размываемых моделях и ряд требований теории подобия. Так, сопротивления на модели должны быть такими же, как и в натуре, т.е.

$$\alpha_\lambda = \alpha_c = 1 \qquad (I)$$

Коэффициент сопротивления на размываемой модели $\lambda_м$ нельзя создавать искусственно, он устанавливается в соответствии с морфологическими образованиями дна, возникающими в результате взаимодействия потока и грунта, из которого сложена модель. Поэтому сопротивления на модели для всех видов наносов, перемещающихся в виде рифелей, как правило, превышают сопротивления русла в натуре. Это, в свою очередь, требует увеличения уклона водной поверхности модельного русла по сравнению с натурой.

Искажение уклона на модели обеспечивает приближенное подобие живых сечений, средних скоростей течения потока по длине размываемой модели, но не исключает некоторого нарушения рас-

пределения эпюры средних и пульсационных скоростей по глубине потока. Не выдерживается и условие уменьшения размера частиц на величину принятого масштаба ($\alpha_d = \alpha_h$), так как это приводит к нарушению условий автомодельности. И, наконец, для соблюдения гидродинамического подобия нельзя искажать вертикальный масштаб.

Но изучение формы поперечного сечения реальных потоков показало, что с уменьшением размера потока отношение ширины к глубине уменьшается, а это требует искажения вертикального масштаба. Можно полагать, что искажение вертикальных параметров потока с изменением размера реки происходит в силу особенностей формирования речных русл, это их естественное требование. Поэтому большинство существующих методов моделирования размываемых русл основывается на условии тождественности морфометрических связей натуры и модели.

В Средней Азии наибольшее распространение в моделировании получила формула С.Т.Алтунина / 2 /

$$B^m = kH. \qquad (2)$$

Из (2) вытекает следующее соотношение основных масштабных множителей:

$$\alpha_B^m = \alpha_h. \qquad (3)$$

Выражение (2) не отвечает условиям размеренности, и поэтому можно выразить сомнение о правомерности применения его для моделирования. Этот недостаток исключается, если принять размерным коэффициент пропорциональности формулы (2). Кроме того, если уравнение описывает как натурные, так и лабораторные условия, то применять его для моделирования вполне допустимо. Физический смысл применения для моделирования зависимости (2) подтверждается опытами В.С.Лапшенкова. На моделях раздельно формировались русла с разными расходами воды 6, I2, 24, 48 л/с каждый при натурном числе Фруда 0,075, которое соответствует руслоформирующему расходу для р.Сырдарьи. Таким образом, лабораторные русла являются моделью натурного, и полученные морфометрические зависимости для них можно экстраполировать на натурные расходы.

По опытным данным в работе /3/ получены формулы

Принципиальные замечания

1.) принята формула Маннинга $v = \frac{1}{n} (\ldots$

2.) принято $\varphi_0 = \text{const} = 0{,}014$ (?)

3) коэффор шероховатости принят как исходное, а не как зависимое переменное от Q, D, i.

4) для модели и натуры n определяется по разным формулам (нарушение III теоремы подобия) –

$$B = 3{,}6\,Q^{0{,}47} \qquad (4)$$

$$H = 0{,}262\,Q^{0{,}35}, \qquad (5)$$

из которых можно получить выражения (2) и (3) с показателем степени $m = 0{,}75$, который рекомендуется С.Т.Алтуниным для р.Сырдарьи. Для моделирования расходов, отличных от руслоформирующих, применение (3) может оказаться не правомерным. Поэтому в работах /4,5/ разработана методика искаженного моделирования русл рек при исследовании диапазона расходов воды с разными числами Фруда. Эта методика основывается на выборе масштабов модели, при которых лабораторная морфометрия после пересчета совпадает с натурной. При этом показано /5/, что результаты пересчета при $F_z \neq idem$ совпадают с пересчетом при $F_z = idem$.

При проектировании крупных каналов в мелкопесчаных грунтах одним из важных вопросов является обеспечение его плановой устойчивости при максимально допустимых скоростях течения. Плановая устойчивость крупных каналов характеризуется параметром продольной устойчивости /6/

$$\varphi = \frac{HJ}{d}, \qquad (6)$$

где φ - параметр плановой устойчивости,
H - средняя глубина потока,
J - уклон водной поверхности,
d - средний диаметр смеси мелкопесчаного грунта.

Для русл статического равновесия $\varphi = 0{,}074$, для начала подвижки $\varphi = 0{,}13$. При $\varphi = 0{,}20$ наблюдается начало массового движения наносов. В пределах $0{,}20 \leq \varphi \leq 0{,}42$ определяется зона динамической устойчивости прямолинейного русла, а в пределах $0{,}42 \leq \varphi \leq 1{,}0$ - извилистого. Значениям $\varphi > 1{,}0$ отвечает зона неустойчивых русл. Выражение (6) представляет собой известный параметр Шильдса $\frac{HJ}{d(\delta-1)}$, увеличенный в $\delta - 1$ раз. Здесь δ есть отношение удельного веса наносов к удельному весу воды. Если рассматривать плановую устойчивость на модели, где используется материал наносов, отличный от натурного, то параметр продольной устойчивости примет вид

5) Неразмерная скорость принята по преобразованной фор-ле Шези это не верно, т.к. приводит к тому что V_0 обратно пропорц. d (см стр 57)

$$\varphi_м = \frac{h_i(\sigma-1)_н}{d_з(\sigma-1)_з}. \qquad (7)$$

Соотношение параметров плановой устойчивости модели и натуры будет следующее:

$$\frac{\varphi_н}{\varphi_м} = \frac{HJ \cdot d_з(\sigma-1)_з}{d \cdot h_i(\sigma-1)_н} \qquad (8)$$

Рассмотрим подробно случай, когда на модели применяется натурный песок. Повышенный интерес к мелкопесчаным моделям объясняется тем, что песок имеется всегда в неограниченном количестве, не изменяет во времени физико-механические свойства, допускает возможность работы модели с мутной водой, поступающей из реки. Это особенно важно при исследовании крупномасштабных моделей каналов, которые требуют большого объема материала. Из выражения (8) при условии равенства поперечного α_b и продольного α_l масштабов получим

$$\frac{\varphi_н}{\varphi_м} = \alpha_h \cdot \alpha_i = \frac{\alpha_h^2}{\alpha_l} \qquad (9)$$

Подставляя в (9) значение α_h по выражению (3), имеем

$$\frac{\varphi_н}{\varphi_м} = \alpha_l^{2m-1} \qquad (10)$$

Из (10) видно, что $\varphi_н = \varphi_м$ только при $m = 0{,}5$. Так как в большинстве случаев $m > 0{,}5$, то из (10) следует

$$\varphi_м = \frac{\varphi_н}{\alpha_l^{2m-1}}. \qquad (11)$$

В частном случае, для р.Сырдарьи при $m = 0{,}75$

$$\varphi_м = \frac{\varphi_н}{\sqrt{\alpha_l}} \qquad (12)$$

Выражение (11) показывает, что для всех методов моделирования, основанных на морфометрических зависимостях при $m > 0{,}5$, модельное мелкопесчаное русло при условии

$F_r = idem$ будет более устойчивым в плане по сравнению с натурой, так как $\varphi_м < \varphi_н$.

Таким образом, приближенное подобие (сходство) модельной и натурной форм поперечного сечения при условии $F_r = idem$ не обеспечивает на песчаной модели плановой устойчивости натурного русла. Кроме того, искажение на модели глубины по сравнению с шириной не дает возможности отображать натурное заложение откосов каналов. На модели они всегда круче натурных и теряют устойчивость не от воздействия потока, а от оползания грунта, так как угол их естественного откоса под водой меньше принятого. В этом случае поперечная устойчивость модели будет нарушена и ширина не будет соответствовать натурной. Для правильного отображения канала на модели его поперечное сечение должно быть либо геометрически подобным натурному, либо иметь минимальное искажение масштабов с соблюдением условия $\varphi = idem$. С этой точки зрения существующие методы искаженного моделирования для исследования каналов являются непригодными.

Проанализируем приведенные в работе /6/ морфометрические зависимости, коэффициенты которых обоснованы данными натурных исследований каналов. Эти зависимости, содержащие размерность в коэффициентах, имеют следующий вид:

$$H = \left\{ \frac{n Q^{0,63}}{1,15 \left[1 + 0,051 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \varphi^{0,3} d^{0,3}} \right\}^{\frac{1}{1,2+y}} \qquad (13)$$

$$y = \frac{\varphi d}{H} , \qquad (14)$$

$$B = 1,15 \left[1 + 0,051 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \frac{Q^{0,37}}{y^{0,20}} , \qquad (15)$$

где B, H – соответственно ширина по урезу воды и глубина наполнения канала,

y – уклон водной поверхности,

n – коэффициент шероховатости; определяется по по-

лученной нами по данным натурных исследований зависимости следующего вида:

$$n = n_0\left[1 + 0{,}083\left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1\right)\right], \qquad (16)$$

где $\varphi_0 = 0{,}074$ – параметр плановой устойчивости в русле статического равновесия,

n_0 – коэффициент шероховатости для русла с значением φ_0 (неподвижная шероховатость), определяется по формуле Чанга

$$n_0 = 0{,}0524\, d^{1/6}, \qquad (17)$$

где d – средний диаметр смеси наносов, м.

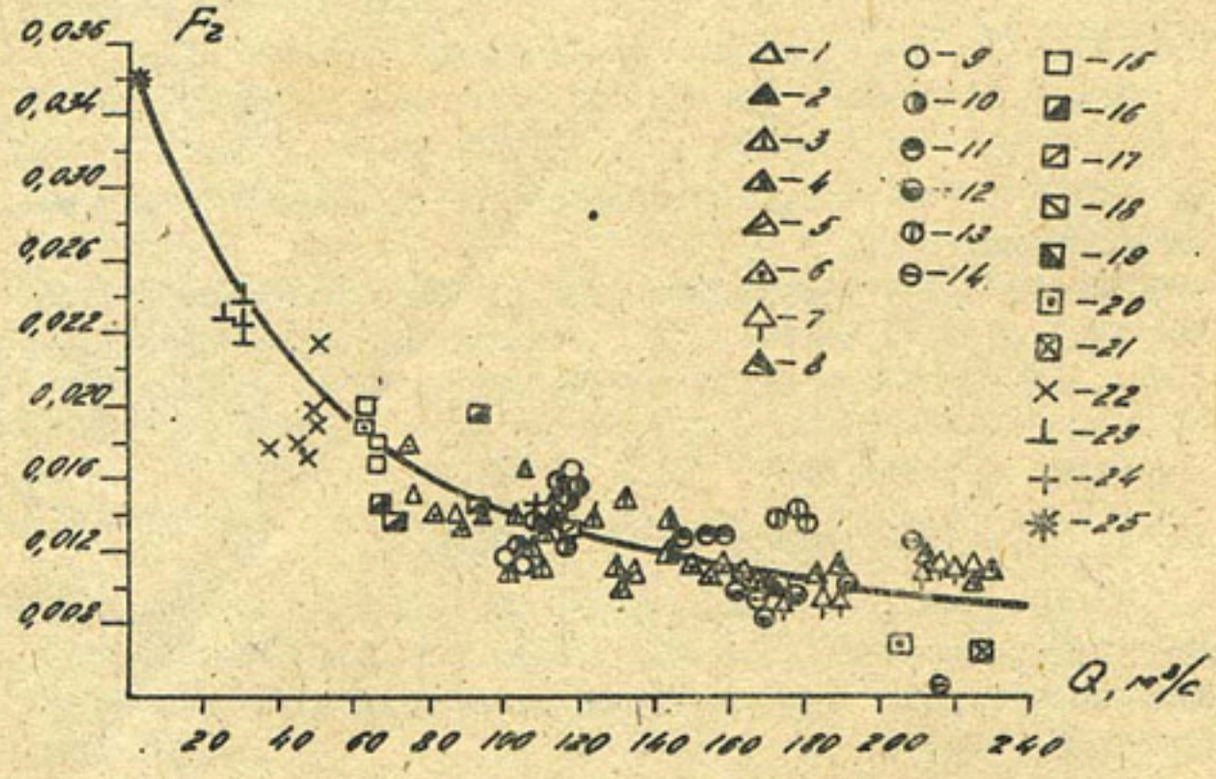
В табл. I приведены результаты расчета гидравлических элементов по формулам (I3), (I4), (I5) для двух каналов, отличающихся расходом воды и имеющих средний диаметр смеси мелкопесчаных наносов $d = 0{,}23$ мм.

Таблица I

$Q, м^3/с$	φ	$B, м$	$H, м$	h	m	n	$i \cdot 10^{-5}$	$v, м/с$	Fr	γ
I000	0,42	I73	7,47	9,68	4,0	0,0I8	I,28	0,775	0,00823	0,I75
I00	0,42	60	2,59	3,36	4,0	0,0I8	3,73	0,642	0,0I63	0,I75

Как видно, каналы с разными расходами имеют геометрически подобные сечения, т.е. $\alpha_B = \alpha_h = \frac{I73}{60} = \frac{7{,}47}{2{,}59} = 2{,}88$ при одинаковом значении параметров плановой устойчивости $\varphi = 0{,}42$. И еще одна характерная особенность – число Фруда увеличивается с уменьшением размера канала.

На рисунке показано изменение числа Фруда в зависимости от пропускной способности каналов. Расходы воды для каждого канала и отдельных участков принимались наибольшие из наблюденных, которые можно принять в качестве руслоформирующих. Как видно, целый ряд существующих каналов в мелкопесчаных грунтах с $d = 0{,}I2 - 0{,}20$ мм подтверждают отмеченную выше закономерность (табл.I) увеличения числа Фруда с уменьшением размера канала в мелкопесчаных грунтах. Отметим, что для некоторых каналов, берега которых сложены суглинистыми и глинистыми грунтами, число Фруда возрастает с ростом расхода, как это имеет место для русл рек. Этим и объясняется про-



Изменение параметра кинетичности в зависимости от руслоформирующего (наибольшего) расхода воды по данным натурных и лабораторных исследований каналов в мелкопесчаных грунтах.

Каракумский канал (данные ТуркменНИИГиМ, Х.Аидов).

210 км: 1-1960г.; 2-1961г. ; 3-1963г.; 4-1964г. 5-1965г.; 6-1966г.; 7-1968г.; 8-1969г.

256 км: 9-1962г.; 10-1963г.; 11-1965г.; 12-1966г.; 13-1967г.; 14-1968г.

295 км: 15-1960г.; 16-1961г.; 17-1962г. ; 18-1963г.; 19-1966г.; 20-1968г.; 21-1970г.

22-Аму-Бухарский (ПК 1639); 23-им.В.И.Ленина. 24-Кызылкумский; 25-песчаная модель крупного канала ($Q = 0{,}206$ м³/с).

тиворечивый результат в расчетных зависимостях, полученных разными авторами.

В табл. 1 и на рисунке использованы натурные расходы и поэтому желательно выяснить значения чисел Фруда для мелкопесчаных моделей. Для условия $\varphi = idem$ из (8) получим

$$\alpha_i = \frac{\alpha_d \, \alpha_{\delta-1}}{\alpha_h},$$

где α_i – масштабный множитель уклона,
α_d – масштабный множитель крупности частиц,
α_h – вертикальный масштабный множитель,
$\alpha_{\delta-1}$ – масштабный множитель относительного удельного веса частиц,
δ – отношение удельного веса частиц к удельному весу воды.

Ряд исследователей /7,8/ после замены $\alpha_i = \frac{\alpha_h}{\alpha_\ell}$ рекомендуют (I8) в качестве соотношения основных масштабных множителей. Известное выражение для коэффициента сопротивления можно записать так:

$$\lambda = \frac{2gHJ}{U^2} = \frac{2J}{F_2} = \frac{2g}{C^2}$$

Откуда для масштабного множителя уклона

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{F_2}}{\alpha_{C^2}} \qquad (I9)$$

Коэффициент Шези определяется по формуле Н.Н.Павловского

$$C = \frac{1}{n} H^y \qquad (20)$$

Выражение (20), как установлено данными модельных исследований, может быть использовано и для лабораторного мелкопесчаного русла несмотря на то, что в нем не удовлетворяется принцип размерности, как и в уравнении (2). Решая (I8), (I9) с учетом (20), получим

$$\alpha_{F_2} = \frac{\alpha_d \, \alpha_{\delta-1}}{\alpha_h^{1-2y} \cdot \alpha_n^2} \qquad (2I)$$

Для серии мелкопесчаных натурных русл, отличающихся расходом воды, можно принять, что $\alpha_n = I$ и $\alpha_d \alpha_{\delta-1} = I$. Тогда из (2I) следует, что чем меньше размер русла, тем больше должно быть для него число Фруда, так как $\alpha_{F_2} < I$ при $\alpha_h > I$. По формуле (2I) при значении $\alpha_h = 2{,}88$ (по данным табл. I) и $\alpha_n = I$ получим $\alpha_{F_2} = 0{,}503$. Если считать, что канал с расходом I000 м³/с есть натура, а с расходом I00 м³/с его ближайшая модель, то число Фруда в канале с меньшим расходом будет равно

$$F_{r_M} = \frac{0,00823}{0,503} = 0,0163 \qquad (21)$$

Полученный результат по выражению (21) совпадает со значением числа Фруда, которое получено расчетом по формулам (13), (14), (15) и приведено в табл. I. Таким образом, выражение (21) отражает закономерность изменения числа Фруда в зависимости от размера потока в мелкопесчаном русле, которая представлена на рисунке и отмечается также по формулам (13), (14), (15) и табл. I.

По имеющимся опытным данным (В.С.Лапшенков, Р.Р.Абдурауп ов, В.А.Скрыльников) коэффициент шероховатости для мелкопесчаных моделей изменяется в зависимости от φ по формулам следующего вида:

$$n_{cp} = n_0 \left[1 + 0,215 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \qquad (22)$$

$$n_{min} = n_0 \left[1 + 0,172 \left(\frac{\varphi}{\varphi_0} - 1 \right) \right] \qquad (22\text{-а})$$

где n_{cp}, n_{min} – среднее и минимальное значения;
n_0 – по формуле (17).

Для мелкопесчаной модели с d = 0,17 мм при значении φ = 0,42 и n_0 = 0,0123 по формуле (17) коэффициент шероховатости по выражению (22) будет равен n = 0,0246. Для натурного канала с расходом 1000 м^3/с, согласно табл. I, n = 0,018. По выражению (21), для α_h = 40 и α_n = 0,731 масштаб числа Фруда α_{F_2} = 0,23. При натурном числе Фруда 0,00823 (табл.I) на модели оно будет равно 0,035, что хорошо согласуется с фактическими данными (рисунок).

Таким образом, для целого ряда натурных каналов в мелкопесчаных грунтах и лабораторного мелкопесчаного русла, отражающего крупный канал, проявляется общая закономерность увеличения числа Фруда с уменьшением размера канала. Можно полагать, что эта закономерность является естественным требованием мелкопесчаных русл каналов и ее необходимо учитывать при моделировании. Деформация русл таких каналов, несмотря на некоторое нарушение кинематики потока, будет подобной, так как в них выдерживается одинаковая подвижность частиц наносов (или одинаковая мера воздействия потока на частицы), которая

определяется параметром φ .

Ранее отмечалось, что по формулам (I3), (I4) и (I5), согласно табл. I, сечения каналов разного размера геометрически подобны друг другу. В масштабных множителях это выражается так:

$$\alpha_h = \alpha_B \qquad (23)$$

Заменяя в (2I) $\alpha_{F_2} = \frac{\alpha_r^2}{\alpha_h}$ и разрешая полученное выражение относительно α_v , имеем

$$\alpha_v = \frac{1}{\alpha_n} \alpha_h^y \alpha_d^{0,5} \alpha_{\delta-1}^{0,5} \qquad (24)$$

Выражение (24) можно получить из формулы Шези для средней скорости потока. Для масштаоного множителя расхода воды рекомендуется следующее выражение:

$$\alpha_Q = \frac{1}{\alpha_n} \alpha_h^{2+y} \alpha_d^{0,5} \alpha_{\delta-1}^{0,5} \qquad (25)$$

Если использовать на модели формулы (I3), (I4) и (I5), то для масштабных множителей ширины и глубины получается взаимосвязь вида

$$\alpha_B = \frac{1}{\alpha_h^{0,586}} \alpha_h \qquad (26)$$

Но зависимость (26) повлияет только на размер поперечного сечения, расход воды и заложение откосов. Поэтому в расчетах рекомендуется использовать выражение (23), которое создает на модели натурное заложение откосов, несколько увеличивает поперечное сечение модели и пропорционально изменяет расход воды.

В табл. 2 приведены значения масштабных множителей, вычисленные по рекомендуемым зависимостям в предположении, что на одной модели средний диаметр песка 0,23 мм, а на другой 0,I7 мм.

В табл. 3 даны элементы натурного канала с расходом I000 $м^3/с$ и двух его моделей (считая канал с расходом I00 $м^3/с$ как одну из моделей) с наносами из мелкого песка для параметра φ = 0,42, отвечающего динамической устойчивости прямолинейного русла.

В САНИИРИ была построена крупномасштабная мелкопесчаная модель с d = 0,I7 мм, на которой исследовалось лабораторное русло с гидравлическими элементами, приведенными в табл. 3.

Таблица 2

$d_н$, мм	$d_м$, мм	α_d	$\alpha_d \cdot \alpha_{\sigma-1}$	α_h	$n_н$
0,23	0,23	I,0	I,0	2,88	0,0I8
0,23	0,I7	I,35	I,35	40,0	0,0I8

$n_м$	α_n	$\alpha_в$	α_a	α_v	α_i	α_{Fz}
0,0I8	I,0	2,88	I0	I,205	0,349	0,505
0,0246	0,73	40	4853	3,03	0,0338	0,23

Таблица 3

Объект	α_h	H, м	B, м	$i \cdot 10^{-5}$	Q, м³/с
Натура	I,0	7,47	I73	I,28	I000
Мелкопесчаные	2,88	2,59	60	3,73	I00
модели	40,0	0,I87	4,33	38,0	0,206

Объект	φ	m	h, м	U, м/с	F_z
Натура	0,42	4,0	9,68	0,775	0,00823
Мелкопесчаные	0,42	4,0	3,36	0,642	0,0I63
модели	0,42	4,0	0,242	0,255	0,035

В течение 220 ч работы модели на рабочем участке заданные гидравлические элементы сохранились без изменения и русло в плане было прямолинейным. При этом движение наносов осуществлялось в виде рифелей, появившихся на дне и низовой части откосов.

Для проверки плановой неустойчивости прямолинейного созданного канала при значениях $\varphi > 0,42$ по формулам (I3), (I4), (I5) были вычислены гидравлические элементы натуры для I000 м³/с при $\varphi = 0,63$, отвечающего динамической устойчивости извилистого русла. Эти элементы пересчитаны на модель по пред-

лагаемой методике и для нового русла проведены исследования. В течение I20 ч работы модели русло существенно деформировалось, приобретая в плане криволинейное очертание.

Таким образом, выполненные лабораторные исследования подтвердили надежность разработанной методики моделирования и обосновали возможность создания мелкопесчаных моделей для исследования плановой устойчивости русл крупных каналов.

Выясним, при каких параметрах заменителей возможно получить на модели условие $F_2 = idem$. Из (2I) можно записать

$$\alpha_d \alpha_{\sigma-1} = \alpha_h^{1-2y} \alpha_n^2 . \qquad (26)$$

Допустим, что на модели предполагается использовать древесные кальцинированные опилки с удельным весом $\gamma_з$ = I,I т/м^3. При значениях $\alpha_h = 40$, $y = 0{,}I75$, $\alpha_n = I$ из (26) получим $\alpha_d = 0{,}66$ и при $d_н = 0{,}23$ крупность заменителя составит $d_з = 0{,}348$ мм. Условие $F_2 = idem$ не обеспечивает $\alpha_i = I$ и, согласно (I8), уклон на модели должен быть искажен. Опилки нашли широкое применение в практике лабораторных исследований САНИИРИ на русловых моделях. Для крупномасштабных моделей каналов применение кальцинированных опилок может оказаться нецелесообразным из-за значительных затрат, труда и времени.

В литературе известно отношение средней скорости потока динамических русл к неразмывающей скорости U_0 , вычисляемой для глубины динамического русла H .

Рассмотрим отношение $\frac{U}{U_0}$, принимая неразмывающую скорость U_0 для русла статического равновесия с глубиной H_0 , отвечающей неразмывающей скорости.

В работе /6/ предложена преобразованная формула Шези для определения средней скорости потока, которая для динамических русл имеет вид

$$U = \frac{\sqrt{\varphi}}{n} H^y \sqrt{d} , \qquad (27)$$

Для русла статического равновесия можно записать

$$U_0 = \frac{\sqrt{\varphi_0}}{n_0} H_0^{y_0} \sqrt{d} = \qquad (28)$$

Для натурных условий отношение $\frac{U}{U_0}$ будет иметь вид

$$\frac{\sqrt{hi}}{\sqrt{d} \cdot 0{,}0524 d^{1/6}} H_0^{y_0} \sqrt{d} = \frac{\sqrt{hi}}{0{,}0524 d^{2/3}} d^{y_2 y_0} H_0^{y_0} =$$

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)_н = \frac{\sqrt{\varphi}}{\sqrt{\varphi_0}} \cdot \frac{n_0}{n} \cdot \frac{H^y}{H_0^{y_0}} \qquad (29)$$

Для модели

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)_м = \frac{\sqrt{\varphi}}{\sqrt{\varphi_0}} \cdot \frac{(n_0)_м}{(n)_м} \cdot \frac{H^y \alpha_n^{y_0}}{H_0^{y_0} \alpha_h^{y}} \qquad (30)$$

Для масштабного множителя $\frac{v}{v_0}$ имеем

$$\alpha_{\frac{v}{v_0}} = \frac{\left(\frac{v}{v_0}\right)_н}{\left(\frac{v}{v_0}\right)_м} = \frac{\alpha_v}{\alpha_{v_0}} = \frac{1}{\alpha_n} \alpha_h^{y-y_0} \qquad (31)$$

Выражение (31) можно получить также с помощью формулы (24), которую для статических условий запишем в виде

$$\alpha_{v_0} = \frac{1}{\alpha_{n_0}} \alpha_h^{y_0} \sqrt{\alpha_d \alpha_{\delta-1}} \qquad (32)$$

Составляя соотношение (24) к (32), получаем

$$\frac{\alpha_v}{\alpha_{v_0}} = \alpha_{\frac{v}{v_0}} = \frac{\alpha_h}{\alpha_h^{y_0}} \frac{\alpha_{n_0}}{\alpha_n} = \frac{\alpha_h^{y-y_0} \alpha_{n_0}}{\alpha_n} \qquad (33)$$

Если на модели и в натуре материал наносов одинаков, то по формуле (17) $(n_0)_м = (n_0)_н$ и $\alpha_{n_0} = 1$. Формула (33) при этом примет вид (31). Из выражения (31) видно, что при $y \cong y_0$ значение $\alpha_{\frac{v}{v_0}}$ зависит только от α_n. Для статических условий, определяемых $\varphi_0 = 0{,}074$, $n = n_0$, $\alpha_n = \alpha_{n_0} = 1$ и значение $\alpha_{\frac{v}{v_0}} = 1$. Откуда $\frac{v}{v_0} = 1$ и $v = v_0$. Вычислим $\alpha_{\frac{v}{v_0}}$ и $\frac{v}{v_0}$ для мелкопесчаных моделей, принимая значение $\varphi > \varphi_0$, в частности $\varphi = 0{,}42$.

Неразмывающая скорость в крупном канале с расходом 1000 м³/с, согласно расчету по нашей методике /6/, при $y = \frac{1}{6}$ и $n_0 = 0{,}013$ ($d = 0{,}23$ мм) составляет $v_0 = 0{,}474$ м/с при $H_0 = 10{,}1$ м. Для динамического русла с $\varphi = 0{,}42$ (предел прямолинейной устойчивости), согласно табл. 1, при $y = 0{,}175$ средняя скорость $v = 0{,}775$, $H = 7{,}45$ м и $n = 0{,}018$.

Для модели с $d = 0{,}17$ мм и $\varphi = 0{,}42$ по формуле (22) $n_{ср} = 0{,}0246$; по формуле (22-а) $n_{min} = 0{,}0222$. Масштабный множитель $\alpha_n = 0{,}731$; $\frac{1}{\alpha_n} = 1{,}368$ и $\alpha_n = 0{,}81$; $\frac{1}{\alpha_n} = 1{,}234$. Задаваясь $\alpha_h = 40$, из выражения (31) получим

$\alpha_{\frac{v}{v_0}} = 1{,}368 \times 1{,}03 = 1{,}41$; $\alpha_{\frac{v}{v_0}} = 1{,}234 \cdot 1{,}03 = 1{,}272$.

Натурное отношение $\left(\frac{V}{V_0}\right)_н = \frac{0,775}{0,475} = 1,63.$

На модели $\left(\frac{V}{V_0}\right)_м = \frac{1,63}{1,41} = 1,15$ и $\left(\frac{V}{V_0}\right)_м = \frac{1,63}{1,272} = 1,28.$

Таким образом, на мелкопесчаной модели при $\varphi = 0,42$ значения $\left(\frac{U}{U_0}\right) = 1,15–1,28$ меньше натурного значения $\left(\frac{U}{U_0}\right)_н = 1,63$. Отсюда следует, что отношение $\frac{U}{U_0}$ на песчаной модели будет меньше натурного для всех значений $\varphi > \varphi_0$.

Все исследователи принимают условие $\frac{U}{U_0} = idem$, следовательно и $\alpha_{\frac{V}{V_0}} = 1$, что справедливо только для статического русла. Для условий динамического равновесия принятие на модели натурного значения $\frac{U}{U_0} > 1,15–1,28$ приведет к тому, что на модели значение φ будет больше предельного значения, равного 0,42 для прямолинейной устойчивости, и русло на модели примет криволинейное очертание в плане. По-видимому поэтому у исследователей и создалось мнение о том, что на песчаной модели нельзя отобразить динамически устойчивый участок канала. Если принять лабораторные отношения $\left(\frac{U}{U_0}\right)_м = 1,15–1,28$ для натуры оез учета масштабного множителя, то это приведет к занижению наибольшей допустимой скорости в натурном канале.

Литература

1. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л., Гидрометеоиздат, 1976.

2. Алтунин С.Т. Регулирование русл. М., Сельхозгиз, 1956.

3. Лапшенков В.С., Дубинчик Е.И. Опыт моделирования русловых деформаций р.Сырдарьи и Чардаринского гидроузла. Вопросы гидротехники, вып.13. Изд. АН УзССР. 1963.

4. Скрыльников В.А. Методические указания по расчету русловых моделей с мелкопесчаными наносами при искаженном масштабировании, ч.I, II, НТО сельского хозяйства, Ташкент, 1977.

5. Скрыльников В.А. Методические указания по расчету моделей русл рек и каналов с наносами из древесных кальцинированных опилок при искаженном масштабировании. НТО сельского хозяйства, Ташкент, 1978.

6. Скрыльников В.А. Губина Т.Ю. К вопросу расчета устойчивых сечений крупных каналов в мелкопесчаных грунтах."Изв. АН УзССР", сер.техн.наук, 1980, №1.

7. Ржаницын Н.А. Моделирование естественных русловых потоков на размываемых моделях. В сб. "Русловые процессы". М., 1958.

8. Орлов И.Я. Русла рек и их моделирование. Труды САНИИРИ, вып. 124, Ташкент, 1970.

9. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М., "Колос", 1979.

У.Ю.ПУЛАТОВ, канд.техн.наук
Р.М.ДАВЛЯКАНОВ
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА КРУПНЫХ КАНАЛОВ ШАГАЮЩИМИ ЭКСКАВАТОРАМИ

Проблема переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан в целях повышения водообеспеченности этих засушливых районов страны является одним из элементов материализации решения XXУI съезда КПСС по дальнейшему увеличению объема и интенсификации сельскохозяйственного производства, а также обеспечению гарантированности получения планируемых объемов продукции растениеводства и животноводства.

Генеральная проектная организация "Союзводпроект" Минводхоза СССР совместно с проектными и научно-исследовательскими институтами разработала основные положения технико-экономического обоснования переброски.

В отделе организации и механизации водохозяйственных работ САНИИРИ согласно плану НИР прорабатывались варианты строительства канала мощными шагающими экскаваторами.[x]

Строительство канала предполагается осуществить различной техникой, в том числе шагающими экскаваторами. Выбор участков канала под шагающие экскаваторы определялся глубиной выемки и длиной с целью обеспечения длительной работы машины без переброски. Исходя из этого для драглайнов выбраны участки: от 705 до II25 км и от I397 до I490 км с общей длиной 5I3 км, при объеме земляных работ I040,8 млн.м^3.

Параметры канала на рассматриваемом участке характеризуются такими показателями: ширина по дну 56 м; крутизна откосов I:6 и I:4; глубина 32 м; ширина по верху 290 м; удельный объем выемки-6540 м^3/м.

---

[x] В разработке темы принимали участие У.Ю.Пулатов (руководитель работ), Р.М.Давляканов (ответ.исполнитель), Е.А.Норкин и Ш.Т.Ташхужаев (соисполнители).

В САНИИРИ проработаны 4 варианта технологических схем строительства экскаваторами в комплексе с бульдозерами, канатноскреперными установками и передвижными транспортерами.

Технологические схемы подбирались исходя из минимума коэффициента переэкскавации при максимальном использовании линейных параметров и производительности экскаваторов.

Вариант I. Канал отрывается шагающими экскаваторами емкостью ковша I5 м^3 и стрелой длины 90 м по схеме на рис.I, а. Данная схема применяется при строительстве канала большого сечения, когда вынутый грунт не может быть размещен в кавальеры с одной проходки экскаватора и производится перекидка грунта. На рис. I с ω_1 , по ω_7 обозначены забои, на которые разбито сечение канала, последовательно разрабатываемые при проходке экскаватора по осям с I по УП; с ω_1' по ω_7' – отвалы, получаемые при разработке этих забоев. После разработки забоя ω_1 следует перекидка отвала $\frac{\omega_1'}{2}$ из положения экскаватора I', затем из положения экскаватора I" – вторичная перекидка грунта отвала $\frac{\omega_1''}{2}$. Конечное положение грунта отвала, вынутого из забоя, обозначено $\frac{\omega_1''}{2}$. Забои (ω_2 и ω_3) разрабатываются с одной перекидкой, забои (с ω_4 по ω_7) – с укладкой грунта непосредственно в отвалы, с ω_4' по ω_7' – без перекидки.

При работе по такой схеме около 20% грунта от всего объема на данном участке укладывается в кавальеры с двойной перекидкой, 40% – с одной перекидкой и только 40% – отсыпается в кавальеры непосредственно после разработки.

Экскаваторные отвалы формируются в кавальеры бульдозерами на тракторе класса I5 т.

Вариант II. Полный профиль канала отрывается шагающими экскаваторами емкостью ковша 25 м^3 и стрелой длины I00 м по схеме на рис.I, б. В этом случае двойной перекидке подвергается около 30 % грунта от всего объема выемки, с одной – около 37% грунта, остальной объем – без перекидки.

Экскаваторные отвалы формируются в кавальеры бульдозерами на тракторе класса 25 т. Если в I варианте канал разрабатывается за 7 проходов экскаватора, то во II – за 5 проходов.

Эксплуатационные параметры шагающих экскаваторов не позволяют разрабатывать все сечение крупных каналов с одновременной отсыпкой экскаваторных отвалов в зону формирования кавальеров и вынуждают производить перекидку грунта, а иногда и двойную.

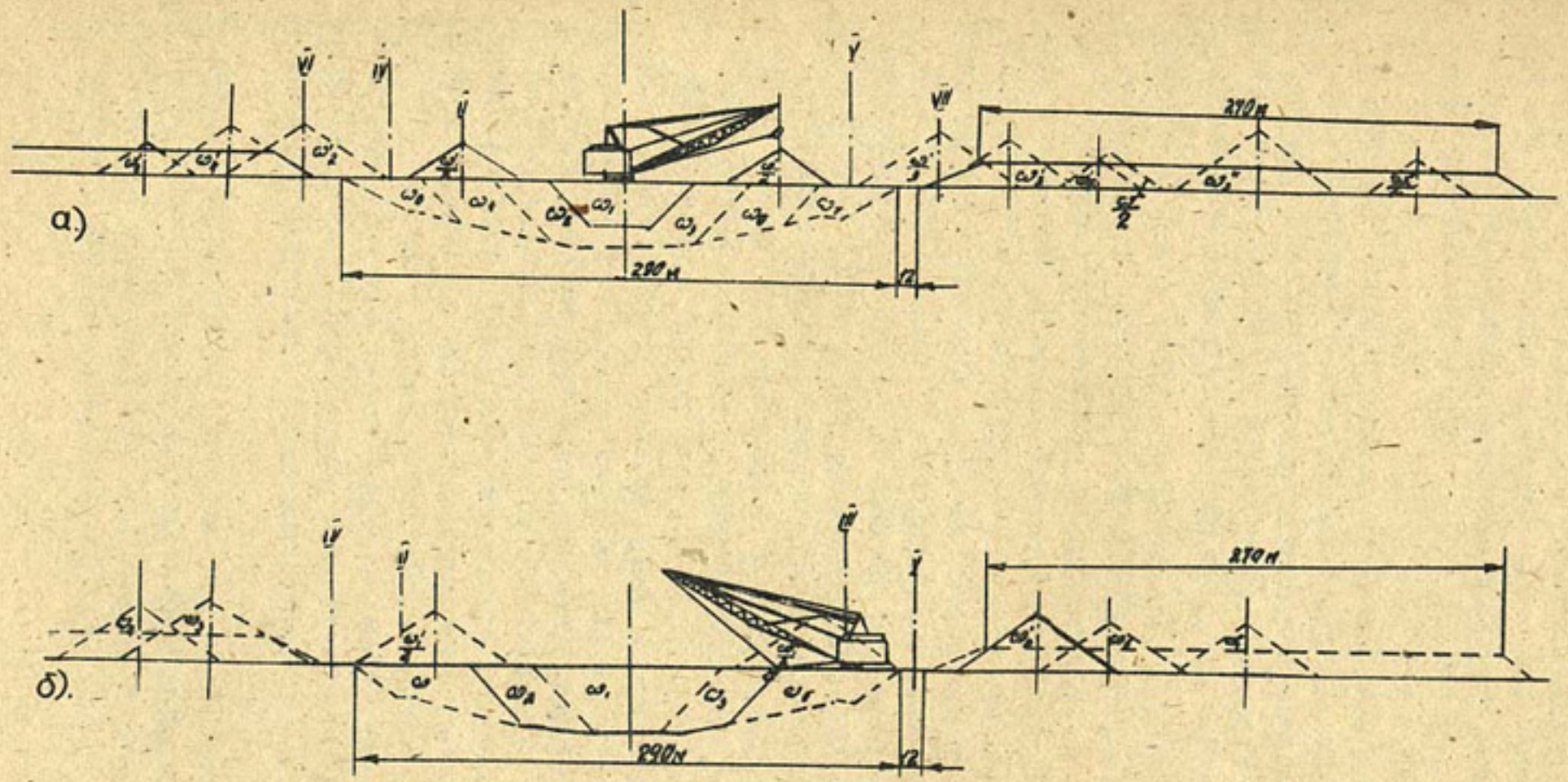


Рис. I. Схема технологической последовательности разработки канала шагающими экскаваторами емкостью ковша I5м^3 (а) и 25 м^3 (б).

В результате увеличивается количество неоходимых для строительства канала шагающих драглайнов большой емкости и повышается стоимость работ. Так, если стоимость разработки I $м^3$ грунта в отвал шагающими экскаваторами емкостью ковша I5 $м^3$ составляет 0,I9 руб., то стоимость I $м^3$ грунта, уложенного в кавальер с учетом перекидки, - 0,35 руб.

Для устранения вышеуказанных недостатков работы шагающих экскаваторов были проработаны варианты с комплексами машин, в которых шагающий экскаватор является ведущей машиной, в основном разрабатывающей грунт, а для перекидки грунта используются канатно-скреперные установки и передвижные конвейеры.

Вариант Ш. Шагающие экскаваторы емкостью ковша I5 $м^3$ разрабатывают полное сечение канала за 3 прохода. Отвалы грунта перемещаются в кавальеры канатно-скреперными установками с ковшом емкостью 6 $м^3$. В качестве мачт в данных установках использованы выпускаемые промышленностью башенные краны типа БК.

Вариант IУ. Предлагается применять копающий комплекс циклично-непрерывного действия "драгвейер", представляющий синтез драглайна и конвейера. Драглайн в отличие от серийно выпускаемых машин снабжается бездонным ковшом и приемным бункером - накопителем, который устанавливается под стрелой у ее основания. Бездонным ковшом разрабатывается грунт в забое и подтягивается к приемному бункеру. Через колосниковую решетку грунт попадает в бункер и далее переносится машинами непрерывного транспорта к месту отвала. Укладка грунта в кавальеры производится отвалообразователями. Производительность этого комплекса по сравнению с серийно выпускаемыми шагающими экскаваторами увеличивается за счет того, что из технологического цикла копания исключаются операции поворота машины к месту отсыпки, выгрузки грунта и поворота к забою. В результате производительность возрастает в 2 раза и более.

Транспортировка грунта к месту отвала может осуществляться различными способами. Из ряда машин, выпускаемых нашей промышленностью, можно составить несколько технологических цепочек.

а) Грунт разрабатывается шагающим экскаватором с длиной стрелы 90 м и оборудованным бездонным ковшом емкостью I5 $м^3$. Далее грунт транспортируется ленточным конвейером в поперечном направлении (рис. 2,а). Комплекс используемых при этом

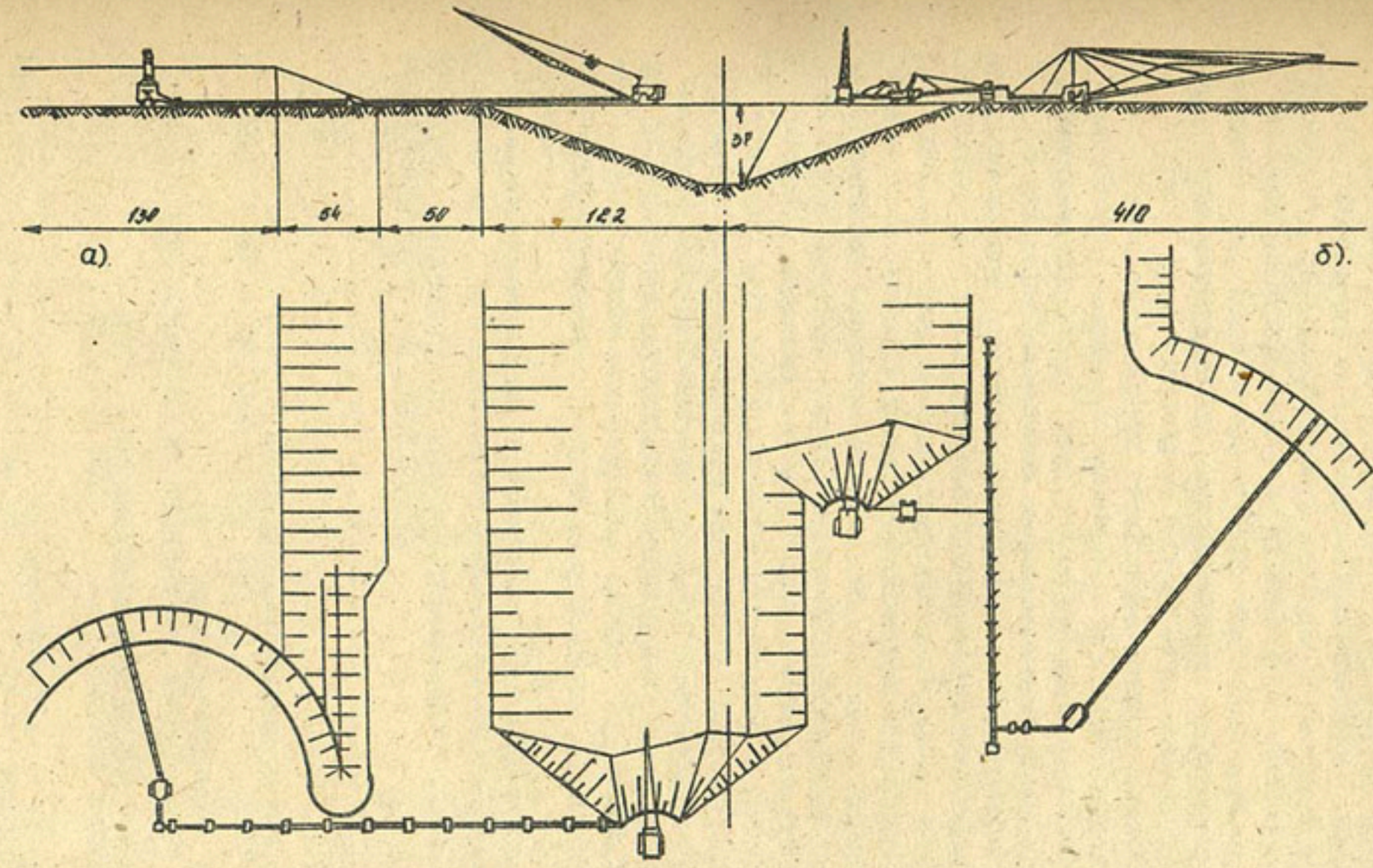


Рис. 2. Технологическая схема разработки канала шагающими экскаваторами, оборудованными бездонными ковшами, в комплексе с поперечным (а) и продольным (б) ленточными конвейерами.

машин располагается в такой технологической последовательности: бункер "драгвейера" - ленточный передвижной конвейер КЛО-250-2М, оборудованный перегрузочной тележкой I600/I,2 - отвалообразователь ОШ-4500/90. Ленточный конвейер монтируется длиной 200-250 м в зависимости от неоходимости и передвигается с помощью одного или двух гусеничных тракторов, оборудованных специальным приспособлением. Для передвижки ленточного конвейера на расстояние I5-20 м потребуется около I часа.

Возможно создание самоходного ленточного конвейера, который бы передвигался на собственном гусеничном ходу перпендикулярно направлению переноса грунта. Самоходный ленточный конвейер сделал бы весь комплекс машин более мобильным и производительным и исключил ряд недостатков, присущих передвижным серийно выпускаемым ленточным конвейером.

б) Из бункера грунт попадает на перегружатель П-I600-50/2I, который подает его на ленточный конвейер, установленный вдоль русла канала (рис. 2,б). На конвейере приемным самоходным бункером БС-I20М и тележкой перегрузочной I600/I,2 грунт сбрасывается на приемную стрелу отвалообразователя ОШР-4500/I80 и укладывается в кавальеры.

Перегружатель П-I600-50/2I, приемный бункер БС-I20 м, тележка перегрузочная I600/I,2, ленточные конвейеры и отвалообразователи выпускаются отечественной промышленностью.

Стоимость I м^3 грунта, разработанного и уложенного по схеме (рис.2,в), составляет 25 коп., а по технологической схеме (рис.2,б) - 27 коп.

Технико-экономические показатели вышеуказанных технологических процессов приведены в таблице.

Показатели	Варианты			
	I	II	III	IУ
I	2	3	4	5
Техническая производительность, м^3/ч	720	900	720	I440
Годовая производительность, млн.м^3	2,42	3,6	2,42	4,84
Себестоимость I м^3 грунта уложенного в кавальер, руб.	0,35	0,29	0,28	0,25

I	2	3	4	5
Трудоемкость, чел.ч/м^3	0,0069	0,013	0,022	0,0062
Металлоемкость, т/м^3	I,98	2,77	3,59	I,48
Энергоемкость, квт/м^3	2,52	I,86	5,68	I,85

Выводы

I. Строительство крупных каналов шагающими экскаваторами осуществляется за несколько проходов машины, при этом только 40% грунта от общего объема сечения канала непосредственно укладывается в кавальеры, для перемещения остальной части грунта требуется одно- или двухразовая перекидка. Так как потребность горнодобывающей промышленности в шагающих экскаваторах типа ЭШ-I5/90 и 20/75 превышает годовой выпуск (I2-I5 шт. с перспективой увеличения выпуска в XI пятилетке до 20-25 шт.), то применение этих машин на строительстве каналов для переэкскавации грунта нецелесообразно.

2. Шагающие экскаваторы необходимо использовать только для разработки грунта, а для перемещения экскаваторных отвалов в зону расположения кавальеров применять другое оборудование, в том числе канатноскреперные установки и передвижные конвейеры.

3. Наиболее экономически выгодным вариантом является комплекс машин, состоящий из шагающего экскаватора большой мощности, оборудованного бездонным ковшом, системы передвижных конвейеров и отвалообразователя.

М.Р.КАРАПЕТЯН, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

ИССЛЕДОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗМЫВАЕМЫХ МОДЕЛЯХ С НЕИСКАЖЕННЫМИ МАСШТАБАМИ

Физическое моделирование легкоразмываемых русл рек и каналов всегда было и до сих пор остается одним из труднейших

вопросов при выполнении исследований. Трудность эта заключается в невозможности использования геометрического подобия одновременного выполнения комплекса критериев $f(F_r, Re, \mathcal{H}_0, Eu) = idem$ и их недостаточности для описания движения взвесенесущих потоков. Моделирование с искажением планового M_e и вертикального M_h масштабов ($M_h \ll M_e$) - один из выходов из создавшихся трудностей. Однако использование для расчета моделей дополнительных критериев, характеризующих движение наносов, наличие достаточной площади под строительство модели и мощности насосов позволяют осуществить моделирование с неискаженными масштабами ($M_h = M_e$).

В настоящей статье рассматривается метод расчета моделей с использованием критерия подвижности

$$\frac{U}{U_0} = idem \qquad (I)$$

для исследования на них русловых процессов, протекающих в мелкопесчаных руслах (U - средняя скорость потока, U_0 - скорость, соответствующая началу подвижки материала).

И.И.Леви отмечает /I/, что при моделировании русловых процессов необходимо обеспечить подобие условий размыва грунта, слагающего ложе реки; при этом масштаб средней скорости M_v должен быть равен масштабу скорости, соответствующей началу подвижки материала M_{v_0}, определяемые из условия $F_r = idem$, т.е.

$$M_v = M_{v_0} = \sqrt{M_h} \qquad (2)$$

Рассмотрим возможность выполнения критерия (I) или тождества (2).

Используя теорию подобия, масштаб средней скорости для общего случая ($F_r \neq idem$) в соответствии с формулой $F_r = \frac{v^2}{gh}$ определится так:

$$M_v = \sqrt{M_h \cdot M_{Fr}} \qquad (3)$$

Формул для определения неразмывающих скоростей имеется множество. Все формулы показательного вида могут быть приведены к виду

$$v_c = K h^n d^{0.5-n}, \qquad (4)$$

где $$K = B\sqrt{\frac{\gamma_1-\gamma}{\gamma}}\sqrt{g} = const;$$

B – опытная константа; γ_1 – удельный вес материала; γ – удельный вес воды; g – ускорение свободно падающего тела; d – диаметр материала, слагающего русло; h – средняя глубина потока; n – опытный показатель степени.

Для мелкопесчаных грунтов, средний диаметр которых $d \leq 0{,}25$ мм, И.И.Леви /2/ предлагает не принимать в расчет диаметр частиц. В последнее время к такому же выводу пришел С.Х.Абальянц. Тогда формула (4) примет вид

$$v_0 = A h^n, \qquad (5)$$

где A – теперь уже другой, отличный от К постоянный коэффициент.

Значение показателя степени n колеблется в больших пределах от n = I/I2 у В.С.Кнороза /3/ до n = I/4 у Б.И.Студеничникова /4/, т.е. $\text{I/I2} \leq n \leq \text{I/4}$.

Применив к (5) теорию подобия, получим масштаб для v_0

$$M_{v_0} = M_h^n \qquad (6)$$

Найдем отношение M_v / M_{v_0}, разделив (3) на (6)

$$\frac{M_h^{1/2} M_{Fr}^{1/2}}{M_h^n} = \frac{M_v}{M_{v_0}} = M_h^{1/2-n} \cdot M_{Fr}^{1/2} \qquad (7)$$

Проанализируем уравнение (7).

При соблюдении критерия (I) или $\frac{M_\alpha}{M_{v_0}} = 1$ из (7) получим

$$M_{Fr} = \frac{1}{M_h^{1-2n/2}} \qquad (8)$$

При соблюдении же критерия $Fr = idem$ имеем

$$\frac{M_v}{M_{v_0}} = M_h^{\frac{1-2n}{2}} \qquad (9)$$

Из уравнения (9) видно, что только при $n = I/2$ возможно одновременное соблюдение критериев $\frac{v}{v_0} = idem$ и $F_r = idem$. Однако, как отмечалось выше, $n < I/2$. Следовательно, одновременное выполнение критерия (I) и $F_r = idem$ невозможно и тождество (2) не выполнимо. Критерий (I) может быть использован при моделировании легкоразмываемых русл рек и каналов, но при этом обязательно искажаются в модели числа Фруда, масштаб которых определяется из уравнения (8).

Исследования Б.И.Студеничникова, С.Х,Абальянца показали, что показатель степени при h в формуле (4) равен 0,25. Тогда уравнения (7) + (9) примут следующий вид:

$$\frac{M_v}{M_{v_0}} = M_h^{1/4} M_{Fr}^{1/2}; \longrightarrow (7^I)\ \frac{M_v}{M_{v_0}} = \left(\frac{M_h}{M_d}\right)^{1/4} M$$

при $\frac{v}{v_0} = idem$, $M_{Fr} = \frac{1}{\sqrt{M_h}}$; $\longrightarrow$ (8^I) $M_{F_2} = \left(\frac{M_d}{M_h}\right)$

при $F_r = idem$, $\frac{M_v}{M_{v_0}} = M_h^{1/4}$ $\longrightarrow$ (9^I) $\frac{M_v}{M_{v_0}} = \left(\frac{M_h}{M_d}\right)$

Используя уравнение (9^I), покажем на примере, что соблюдение тождества (2) приводит к нереальным результатам. Для этого примем масштаб модели $M_h = 40$. В модели используется натурный песок, $d_{ср} = 0,20$ мм, неразмываемая скорость которого при глубине потока на модели 5–I0 см составляет $v_{0м} = 0,I8$ м/с; средняя скорость на модели $v_м = 0,25$ м/с. Найдем масштабы для v и v_0.

а) Следуя тождеству (2),

$$M_v = M_{v_0} = \sqrt{40} = 6,3.$$

Натурное значение средней скорости будет

$$v_н = v_м\, M_v = 0,25 \cdot 6,3 = 1,57\ м/с,$$

а значение скорости, соответствующей началу подвижки,

$$v_{0н} = v_{0м} \cdot M_{v_0} = 0,18 \cdot 6,3 = 1,13\ м/с.$$

Отношение найденных величин $\frac{v_н}{v_{0н}} = \frac{v_м}{v_{0м}} = I,39$.

При глубине натурного потока, равного 2÷4 м ($h_н = h_м \cdot M_h = /0,05 \div 0,I0/ \cdot 40$), скорость $v_0 = I,I3$ м/с является явно размывающей, что может быть проверено по любой из существующих

формул /3, 4/.

о) Используем теперь уравнение (9^{I}) для этих же исходных данных

$$\frac{M_\sigma}{M_{\sigma_0}} = 40^{1/4} = 2{,}5 \ ;$$

$$M_\sigma = \sqrt{M_h} = 6{,}3 \ ; \quad M_{\sigma_0} = M_h^{1/4} = 2{,}5$$

$$\vartheta_н = 0{,}25 \cdot 6{,}3 = 1{,}57 \ м/с ,$$

$$\vartheta_{0н} = 0{,}18 \cdot 2{,}5 = 0{,}45 \ м/с \ ;$$

$$\frac{\vartheta_н}{\vartheta_{0н}} = 3{,}5 \ ; \qquad \frac{\vartheta_м}{\vartheta_{0м}} = 1{,}39$$

В последнем случае значение неразмывающей скорости 0,45 м/с при $h_н$ = 2+4 м практически совпадает с расчетными значениями.

Известно, что отношение $\frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ характеризует движение наносов: чем больше это отношение, тем быстрее и больше движется наносов. Однако при использовании тождества (2), как показал пример, величина $\frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ в 2,5 раза меньше, чем при использовании уравнения (9^{I}), т.е. в первом случае при пересчете на натуру модельных данных при условии $F_r = idem$ имеем форму движения наносов, отличную от формы движения наносов в модели, т.е. при одном и том же значении $\frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ в модели наносы движутся быстрее, чем в натуре, что противоречит основам моделирования и показывает несостоятельность тождества (2).

Рассмотрим моделирование коэффициента гидравлического сопротивления λ, который для открытых потоков определяется по формуле

$$\lambda = \frac{2g h_i}{\vartheta^2} = \frac{2i}{F_r} ,$$

где i – уклон водной поверхности.

В масштабных множителях это уравнение примет вид

$$M_\lambda = \frac{M_i}{M_{F_r}} . \qquad (10)$$

Масштаб уклона для общего случая моделирования определяется по формуле /5/

$$M_i = \frac{M_h}{M_e} M_{Fr}, \qquad (II)$$

а при неискаженном моделировании

$$M_i = M_{Fr} \qquad (I2)$$

Подставив (I2) в уравнение (I0), получим

$$M_\lambda = 1, \qquad (I3)$$

т.е. масштаб коэффициента гидравлического сопротивления при моделировании в моделях с неискаженными плановым и вертикальным масштабами не зависит от того, моделируем ли мы по Фруду или искажаем числа Фруда. Здесь же следует отметить, что использование так называемого критерия плановой гидравлики, имеющего вид $\lambda \frac{B}{h} = id$, при неискаженном моделировании теряет смысл, так как в этом случае $M_\lambda = 1$ (I3), а $M_B = M_h$.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующие выводы: моделирование русловых процессов в легкоразмываемых грунтах может быть осуществлено на модели с неискаженными масштабами ($M_h = M_e$) с применением как песка, так и его заменителей; соблюдение при моделировании критерия $\frac{v}{v_0} = id$ возможно только при искажении чисел Фруда, масштабы которых определяются из уравнений $(7^I) \div (9^I)$ в зависимости от поставленной задачи. Одновременное соблюдение критериев $\frac{v}{v_0} = id$ и $F_r = id$ невозможно.

Сводная таблица масштабных множителей

Масштабный множитель	Условия		
	$\frac{v}{v_0} \neq idem$, $F_r \neq idem$	$\frac{v}{v_0} = idem$, $F_r \neq idem$	$\frac{v}{v_0} \neq idem$, $F_r = idem$
$M_h = M_e$	Задается		
M_{v_0}	Исходная величина		

M_{Fr}	$\left(\frac{M_v}{M_{v_0}}\right)^2 \frac{1}{M_h^{1/2}}$	$\frac{1}{M_h^{1/2}}$	1
M_v	$\sqrt{M_h M_{Fr}}$	$\sqrt{M_h M_{Fr}}$	$\sqrt{M_h}$
M_a	$M_h^{2,5} \sqrt{M_{Fr}}$	$M_h^{2,5} \sqrt{M_{Fr}}$	$M_h^{2,5}$
M_i	M_{Fr}	M_{Fr}	1
M_λ	1	1	1

Найденные зависимости (7^I) + (9^I), (I2), (I3) позволяют получить остальные масштабы для пересчета модельных данных на натуру (см.таблицу) и рассчитать модель при любых поставленных условиях: I) искажаются оба критерия – $\frac{v}{v_0} \neq id$ и $Fr \neq id$, 2) выполняется критерий $\frac{v}{v_0} = id$ и моделирование осуществляется не по Фруду, масштаб числа Фруда определяется из уравнения (8^I); 3) моделирование по Фруду ($Fr = id$), а масштаб $\frac{v}{v_0}$ определяется из уравнения (9^I). Во всех случаях масштаб глубин, равный плановому масштабу, является исходной величиной, известной величиной также должна быть скорость v_0 для песка натуры и материала, используемого в модели.

С помощью изложенной методики моделирования на размываемых моделях можно решать вопросы подбора размеров устойчивых русл каналов, изучения русловых процессов в легкоподвижных руслах рек и каналов, а также, задаваясь определенными значениями отношения $\frac{v}{v_0}$, исследовать допустимые деформации в искусственных линейных сооружениях.

Литература

I. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. Л., "Энергия", I967.

2. Леви И.И. Динамика русловых потоков. М., Госстройиздат, I957.

3. Кнороз В.С. "Неразмывающие" скорости разнозернистых по крупности несвязных материалов. Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, вып.7I. Л.,, I962.

4. Студеничников Б.И. Размывающая способность потока и методы русловых расчетов. ВНИИВОДГЕО. М., I964.

5. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л., Гидрометеоиздат, I976.

А.М. МУХАМЕДОВ, докт.техн.наук
Х.Х.ИШАНОВ
Т.Ж. ЖУРАЕВ, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРА ФОРМЫ УСТОЙЧИВЫХ СЕЧЕНИЙ КАНАЛОВ

Одной из основных задач проектирования земляных каналов является выбор оптимального значения параметра формы русла, обеспечивающего наименьшую деформацию русла.

Существуют различные взгляды на роль отдельных факторов, влияющих на параметр $B/H_{ср}$ [1-4]. Отсюда и противоречивые результаты, причина которых - недостаточный учет гидравлических и грунтовых характеристик.

Для установления зависимости формы поперечного сечения русла от гидравлических характеристик потока нами были проведены исследования деформации русла при разных значениях $B/H_{ср}$, расхода воды Q и относительной скорости U/U_0 на крупномасштабных размываемых моделях длиной 220 м, шириной 10 м. При этом в качестве заменителя натурного песка использовали керамзитовый, с объемным весом 0,7-0,9 т/м^3 и удельным 1,9-2,1 т/м^3.

Исследовались три трапецеидальных сечения с параметрами формы русла соответственно 12, 18 и 25. Всего проведено шесть опытов. Каждое сечение подвергалось воздействию потока с относительными скоростями $U/U_0 = 1,2$ и 1,3 (U - фактическая средняя скорость, U_0 - предельная неразмывающая скорость). Расход воды изменялся от 0,124 до 0,390 м^3/с.

Первоначальная глубина во всех опытах была постоянная и равнялась $H = 0,3$ м. Для каждой серии опытов первоначальное русло формировалось с помощью металлических шаблонов, соответствующих заданному сечению. Шаблон закреплялся на электромеханическом мостике, передвигающемся вдоль модели на рельсовых путях. Сформированное шаблоном

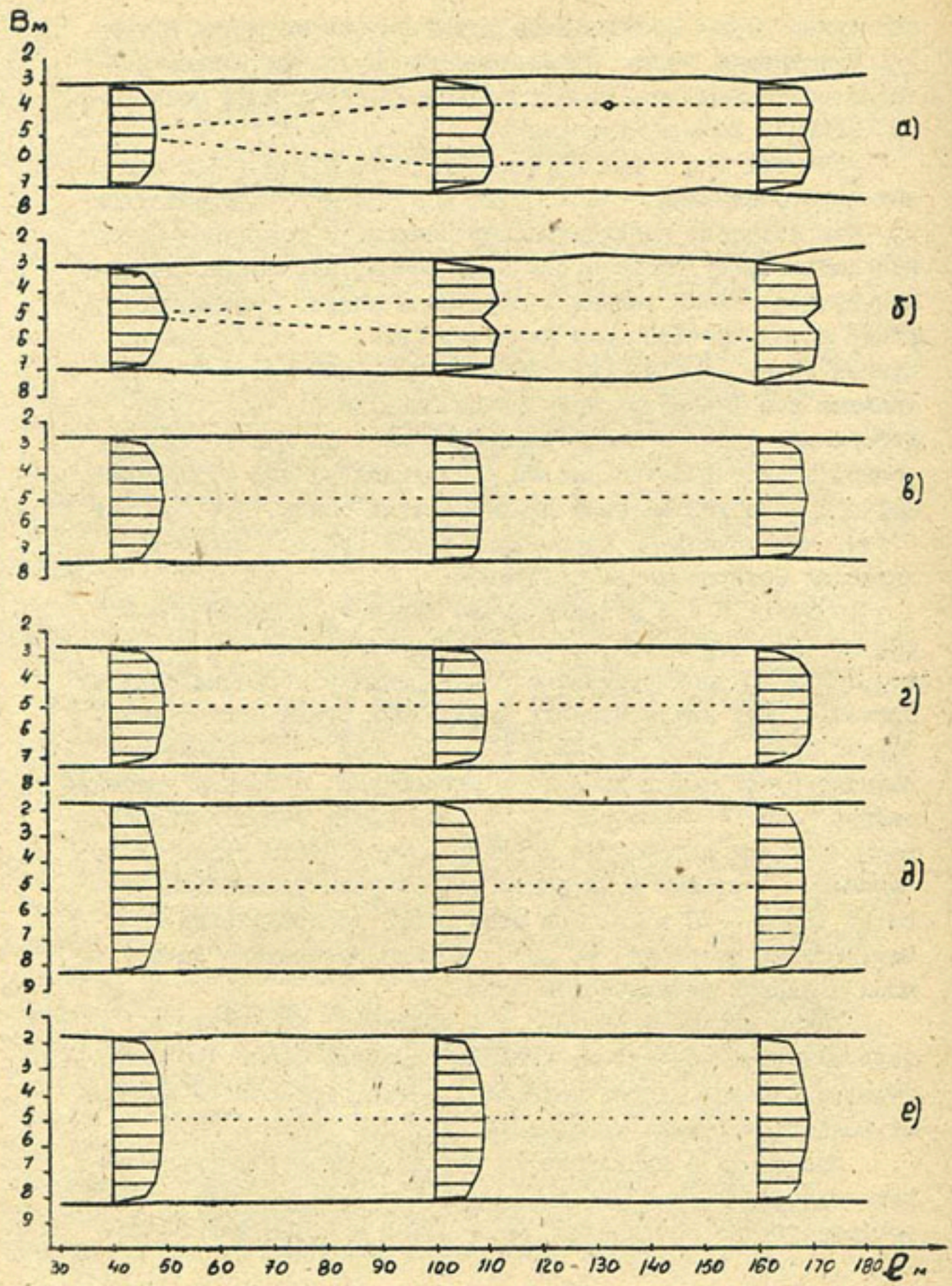
модельное русло замачивалось водой в течение одних суток для уплотнения песка. После замочки на модели устанавливался постоянный ток воды с расходом, отвечающим принятому значению U/U_0 для опыта.

В опытах I и 2 при $B/H_{ср}$ = I2, U/U_0 = I,2 и I,3 расход воды составлял Q = 0,I24 и 0,I34 м^3/с соответственно. Как показали наблюдения, первоначально созданное сечение почти сразу после пуска воды начало интенсивно деформироваться: стало мелким и широким в плане. Деформации русла носили необратимый характер (рис. а, б). Из рисунков видно, что за счет интенсивного размыва берегов и подъема дна параметр русла увеличился до $B/H_{ср}$ = 4I–46. Деформация русла в плане распределилась по длине неравномерно, а водный поток как бы разделился на две отдельные струи с самостоятельными динамическими осями. Это говорит о том, что сечение с параметром формы русла $B/H_{ср}$ = I2 является совершенно неустойчивым.

В опытах 3 и 4 сечение имело параметр формы $B/H_{ср}$ = I8, U/U_0 = I,2 и I,3, расходы воды на модели Q = 0,234 и 0,253 м^3/с соответственно. Наблюдения в процессе опытов показали, что интенсивность деформации русла была значительно ниже, чем в опытах I и 2. По всей длине модельное русло деформировалось равномерно, сохраняя прямолинейную форму в плане (рис. в, г). Ввиду малой интенсивности боковых деформаций к концу опытов русло расширилось ненамного, отсюда и параметр формы русла увеличился всего до $B/H_{ср}$ = 20 и 23. При этом эпюры распределения поверхностных скоростей по длине модели оставались идентичными с единой динамической осью.

Таким образом, опыты 3 и 4 показали, что русло с первоначальным сечением, имеющим параметр формы $B/H_{ср}$= I8, характеризуется слабой неустойчивостью, которая не вызывает больших и резких деформаций, как при $B/H_{ср}$ = I2.

Опыты 5 и 6 проводили на модели, параметр формы сечения которой $B/H_{ср}$= 25, U/U_0 = I,2 и I,3, расходы соответственно составляли Q = 0,36I и 0,390 м^3/с. Наб-



План русла на модели и эпюры распределения поверхностных скоростей потока в опытах.

людения показали, что деформация русла в плане через 30-40 ч полностью прекратилась, и русло стабилизировалось. Ширина модели по всей длине практически осталась постоянной. Никаких изменений прямолинейного планового очертания русла не наблюдалось (рис д, е). Эпюры распределения поверхностных скоростей по всей длине русла сохранились одинаковыми, что свидетельствует о равномерном движении потока.

Следовательно, проведенные на крупномасштабных размываемых моделях исследования по установлению формы сечения русла показали, что для конкретного расхода и гидравлического режима существует вполне определенная оптимальная форма сечения и размеры русла, характеризуемые прежде всего оптимальными значениями параметра формы русла $B/H_{ср}$. Если этот параметр меньше оптимального значения для данного расхода воды и режима движения, то поток будет сильно размывать берега. Продукты размыва, осаждаясь на дне канала, уменьшают глубину потока, что может привести к увеличению параметра русла, следовательно, и к раздвоению потока.

Интенсивность деформации русла тем сильнее, чем меньше параметр формы русла первоначального сечения и чем больше относительная скорость потока U/U_0, количественная оценка которой будет уточнена в дальнейших исследованиях. Оптимальными значениями параметра формы сечения можно считать $B/H_{ср}$ = 18-25, при которых деформация русла сводится к минимуму.

Таким образом, при проектировании земляных каналов необходимо обратить особое внимание на выбор оптимального значения параметра формы и соответствующей ему формы поперечного сечения русла.

Литература

1. Железняков Г.В., Аннаев С.А. Формирование русла Каракумского канала. "Вестник с/х наук", 1967, № 5.

2. Михалев М.А. Особенности гидравлического расчета крупных необлицованных каналов в несвязных грунтах с учетом транспорта наносов. Тр. ЛПИ, № 351, Л., 1976.
3. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. "Колос", М., 1979.
4. Каримов Р.М. Гидравлический расчет каналов. Ташкент, 1976.

К.В. ГРОМЫКО, канд.биол.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

ПРОГНОЗ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СЫРДАРЬИ И АМУДАРЬИ В СВЯЗИ С ПЕРЕБРОСКОЙ ЧАСТИ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК

Переброска части стока сибирских рек в бассейн Аральского моря явится новым шагом по территориальному перераспределению водных ресурсов, в связи с чем возникают совершенно новые проблемы, связанные с изменением биологического режима не только отдельных регионов, но и целых экологических систем значительных территорий. В сфере этих проблем нами рассматривался прогноз гидробиологического режима Сырдарьи и Амударьи в связи с переброской в их бассейн части стока Оби и Иртыша.

Общепринятых, твердых методов экологического прогноза пока не существует. В процессе работы мы пользовались методом аналогии и оценки адаптационных возможностей водных организмов. При этом использовались материалы отдела охраны водных ресурсов САНИИРИ, включающие собственные исследования автора и анализ 30 литературных источников по биологии водоемов бассейна Сырдарьи и Амударьи, материалы НИИББ Томского Государственного Университета, включающие обзор 240 научных работ по биологии водоемов Западной

Сибири и Казахстана, а также другие литературные данные по биологии и систематике водных организмов /I, 2, 3, 4, 5, 6/.

Прогноз гидробиологического режима рр. Сырдарьи и Амударьи проводился в три этапа: первый этап включал анализ ретроспективного и современного гидробиологического режима рек, второй - прогноз этого режима без переброски части стока сибирских рек и третий - прогноз гидробиологического режима в условиях переброски части стока Оби и Иртыша.

Анализ ретроспективного состояния Сырдарьи и Амударьи показал, что до сооружения на них русловых водохранилищ из-за высокого содержания взвешенных минеральных веществ они были практически лишены фито- и зоопланктона и имели крайне слабо развитый бентос. И только после образования водохранилищ, в которых происходила аккумуляция взвешенных веществ и формировались условия, способствующие развитию водных организмов, гидробиологический режим рек претерпел коренные изменения: ниже этих водохранилищ они имели уже осветленные воды и планктон, вынесенный из этих водоемов. Но в отличие от европейских и сибирских рек этот планктон здесь не перерабатывался в речной комплекс организмов, так как вторичное возрастание мутности воды приводило к гибели подавляющего большинства его организмов. Поскольку переброску стока сибирских рек предполагается осуществить в Чардаринское и Туямуюнское водохранилища, прогноз гидробиологического режима этих рек может быть в принципе сведен к прогнозу их водохранилищ.

Чардаринское водохранилище расположено в среднем течении р. Сырдарьи. В фитопланктоне этого водохранилища обнаружено 571 таксон водорослей, среди которых преобладают зеленые (280), синезеленые (122) и диатомовые водоросли (95). Максимального развития фитопланктон достигает летом и ранней осенью за счет массового развития зеленых водорослей, численность которых достигает 7-8,5 млн.кл/л, а биомасса - 1,7-2,8 г/м^3.

Высшая водная растительность развивается преимущественно по более изрезанному и мелководному левому берегу водохранилища, правый берег, где должен завершаться канал переброски, практически лишен таковой.

Зоопланктон водохранилища представлен 56 формами организмов: коловратками (24), ветвистоусыми (26) и веслоногими (16) рачками. Наибольшего развития он достигает летом, когда численность организмов превышает 108,0 тыс.экз/м^3, а биомасса - 3,2 г/м^3. В среднем биомасса зоопланктона по водохранилищу составляет 1,6-2,6 г/м^3. В эколого-географическом отношении зоопланктон Чардаринского водохранилища формируется преимущественно за счет эвритопных и озерно-речных форм с широким ареалом. Ведущими формами бентоса являются личинки хирономид и олигохеты, биомасса которых в средней части водохранилища составляет 2,2 г/м^2, а в приплотинной снижается до 0,14 г/м^2.

Прогноз гидрохимического режима Чардаринского водохранилища без переброски части стока сибирских рек показал, что основным фактором, определяющим изменение абиотических условий, явится изменение минерализации воды, которая повысится до 1,53-1,65 г/л по сравнению с 1,1-1,2 г/л в настоящее время /7/. Такое увеличение минерализации воды не превысит значения, которое могло бы повлечь изменение качественного состава планктона водохранилища, поэтому до переброски части стока сибирских рек он не претерпит особых изменений. Кроме того, возрастающее эвтрофирование водохранилища вызовет увеличение биологической продуктивности водоема. Однако, эвтрофирование воды не достигнет величины, обусловливающей развитие "цветения воды".

С переброской части стока сибирских рек, минерализация вод которых будет достигать 0,24-0,6 г/л, соленость воды в Чардаринском водохранилище уменьшится до 1,23-1,32 г/л /7/. Это незначительное уменьшение минерализации воды явится основным следствием переброски. Поэтому в силу своего малого влияния на абиотический режим водохранилища переброска части стока сибирских рек не повлияет на местную гидрофауну.

При переброске части стока сибирских рек гидробиологический режим Чардаринского водохранилища сформируется из местных организмов и организмов канала переброски, основу гидрофауны которого составят организмы из.Тобольского водохранилища. Биоценоз водохранилища, в свою очередь, будет формироваться, в основном, за счет эврибионтных, озерно-речных и зарослевых форм организмов. В канале переброски весь этот комплекс организмов в результате прохождения через насосные станции, дюкера и т.д. подвергнется переработке, в результате которой в планктоне останутся преимущественно эврибионтные и озерно-речные формы коловраток и веслоногих рачков. На концевом участке канала, где в результате уменьшения скорости течения воды и развития высшей водной растительности будут благоприятные условия для развития придонно-зарослевых форм, планктон канала может пополниться этими формами организмов.

Следовательно, в Чардаринское водохранилище каналом переброски будет вноситься эврибионтный и озерно-речной, а в случае зарастания канала и придонно-зарослевый комплексы организмов сибирских рек. Исключение составят только некоторые холодолюбивые стенотермы, которые выпадут из биоценоза канала.

Экологический анализ фауны канала переброски показывает, что подавляющее большинство организмов обладает широким ареалом и почти повсеместно распространено в водоемах Палеарктики, в том числе и в водоемах бассейна р. Сырдарьи. Но в Чардаринском водохранилище оптимальные условия для существования будет преимущественно для эврибионтных и озерно-речных форм организмов. В видовом отношении они составляют в настоящее время основу зоопланктона этого водоема. Из природно-зарослевого комплекса канала в водохранилище сохранятся в основном только придонные формы, которые также повсеместно встречаются в современной фауне этого водоема, но играют в ней второстепенную роль. Поэтому нет основания предполагать, что с переброской части стока сибирских рек они будут оказывать более

заметное влияние на ее формирование. фитофильные организмы канала не встретят в водохранилище благоприятных условий, так как район впадения канала практически на большом расстоянии лишен всякой высшей водной растительности.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что переброска части стока сибирских рек, даже в случае развития в канале придонно-зарослевого комплекса организмов с не встречающимися в фауне Чардаринского водохранилища формами не вызовет перестройку и особых изменений состава планктона этого водоема.

Следует отметить, что переброска части стока сибирских рек приведет к уменьшению плотности планктона и биомассы, так как планктон водохранилища будет "разбавляться" водами канала с менее развитой гидрофауной, из которой к тому же выпадет существенная часть организмов придонно-зарослевого комплекса. Кроме того, переброска части стока сибирских рек приведет к снижению концентрации биогенных элементов в водохранилище, что обусловит снижение развития фитопланктона и зоопланктона.

В формировании донных биоценозов канала переброски будут участвовать личинки хирономид, олигохеты, пиявки, моллюски и другие организмы, большая часть которых встречается в бентосе р. Сырдарьи. Исключение могут составить моллюски, фауна которых в Чардаринском водохранилище очень бедна, поэтому в случае внедрения и заселения водохранилища они составят его новое качественное звено.

Из сибирской ихтиофауны предполагается, что наиболее массовым видом в канале переброски явится ерш, известный в бассейне Аральского моря, только в некоторых дельтовых водоемах рек Сырдарьи и Амударьи. Являясь широко эвритопным видом, при массовом развитии в канале переброски он, несомненно, будет интенсивно внедряться в ихтиофауну водоемов бассейна р. Сырдарьи. Различия температурного режима сибирских и среднеазиатских водоемов не должны послужить препятствием для его распространения, так как ерш не яв-

ляется холодноводным стенотермом и встречается в хорошо прогреваемых водоемах Европы и Сибири. Современный ограниченный ареал ерша в бассейне р. Сырдарьи, видимо, определяется тем, что его распространению препятствовало высокое содержание взвешенных веществ в реке. Внедрение ерша в ихтиофауну р. Сырдарьи может оказать существенный ущерб ее рыбному хозяйству, так как являясь жестоким пищевым конкурентом ряду ценных промысловых рыб, сам ерш как объект промысла ценности не представляет.

Гидробиологический режим Туямуюнского водохранилища в настоящее время еще не исследован, однако можно предположить, что он будет иметь много общих черт с гидробиологическим режимом водохранилищ р. Сырдарьи, так как в основном сформируется за счет биоценозов пойменных водоемов, качественный состав которых близок к таковому водоемов р. Сырдарьи. Поэтому все выводы по гидробиологическому прогнозу этой реки в основных вопросах будут соответствовать прогнозу гидробиологического режима р. Амударьи.

Выводы

I. Переброска части стока сибирских рек не вызовет существенного изменения качественного состава фито- и зоопланктона рр. Сырдарьи и Амударьи, зообентос этих рек может пополниться новыми формами моллюсков, в ихтиофауну рек может внедриться ерш, являющийся жестоким пищевым конкурентом многих ценных промысловых рыб.

2. Переброска части стока сибирских рек будет способствовать улучшению качества воды рр. Сырдарьи и Амударьи, снижению индекса сапробности, но в размерах, не превышающих выхода этого значения за существующие в настоящее время пределы - β - мезосапробности.

Литература

I. Мануилова Е.Ф. Ветвистые рачки фауны СССР. М.-Л., "Наука", 1964.
2. Кутикова Л.А. Коловратки фауны СССР. М.-Л., "Наука", 1970.
3. Рылов В.М. Фауна СССР. Ракообразные, т. 3, вып. 3, М.-Л., "Наука", 1948.
4. Жадин В.И. Пресноводные моллюски СССР. ОГИЗ, Ленснабтехиздат, Л., 1933.
5. Николаенко В.А., Орлова А.П., Дунин-Барковская О.С. Прогноз качества воды рек Сырдарьи и Амударьи с учетом переброски части стока сибирских рек. Сб.научн.трудов, вып. 162, САНИИРИ, Ташкент, 1981.

Р.Р. АБДУРАУПОВ, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ СХЕМЫ ВОДОЗАБОРА ИЗ р.ОБИ В ГЛАВНЫЙ КАНАЛ ПЕРЕБРОСКИ

Головное сооружение - одно из основных элементов Главного канала переброски (ГКП). Обеспечение водозабора в ГКП согласно графику водопотребления зависит от конструкции водозаборных сооружений.

В составе инженерных решений по переброске части стока сибирских рек в Среднюю Азию I очереди предусматриваются два варианта водоподачи в ГКП с бесплотинным водозабором: с обратным током по руслу Нижнего Иртыша (по схеме "анти-Иртыш") и по руслу специального Левобережного Иртышского канала (ЛИК), протрассированному па-

раллельно реке вверх по ее течению. Водозабор в обоих вариантах предполагается осуществлять из р. Оби: по I варианту - непосредственно в устье Иртыша, по II - ниже устья на 10-15 км.

При разработке схемы водозабора для I варианта (по схеме „анти-Иртыш") был изучен и обобщен опыт проектирования и эксплуатации многих крупных бесплотинных водозаборов. При этом были выявлены основные факторы, определяющие схему и возможную величину водозабора. Рекомендована методика расчета водоприемника и подводящего канала к насосным станциям. Изучены наносный, водный и зимний режимы, русловые процессы и другие условия формирования русла рек Оби и Иртыша. Рассмотрены условия перемещения рыбы и судоходства.

В результате выполненных проработок была предложена схема бесплотинного водозабора по типу ковша с низовым входом, под углом отвода 130°. Для этой схемы были определены условия водозабора из р. Оби в створе устья Иртыша-одноголовый водозабор и в вышерасположенных створах - многоголовый, с расходом водоподачи 430 м³/с, без подпора- 700 м³/с, с подпором в летний период - 2400 м³/с и в зимний - 230 м³/с.

Для улучшения условий водозабора при прохождении минимального гарантированного расхода воды предложено русло Оби регулировать системой шпор - полузапруд и расчисткой русла на подходе к водозаборным отверстиям. Кроме того, намечены мероприятия по борьбе с завлечением наносов в канал и с шуголедовыми явлениями при водозаборе. Выполнен краткий анализ русловых процессов и определена степень устойчивости русла рек Оби и Иртыша. Обобщена существующая методика моделирования и выбраны основные критерии моделирования и масштабы модели русла и сооружений бесплотинного водозабора, по которым запроектирована и построена модель с неразмываемым руслом, имеющим плановый масштаб 1:500 н.в. и вертикальный 1:40 н.в.

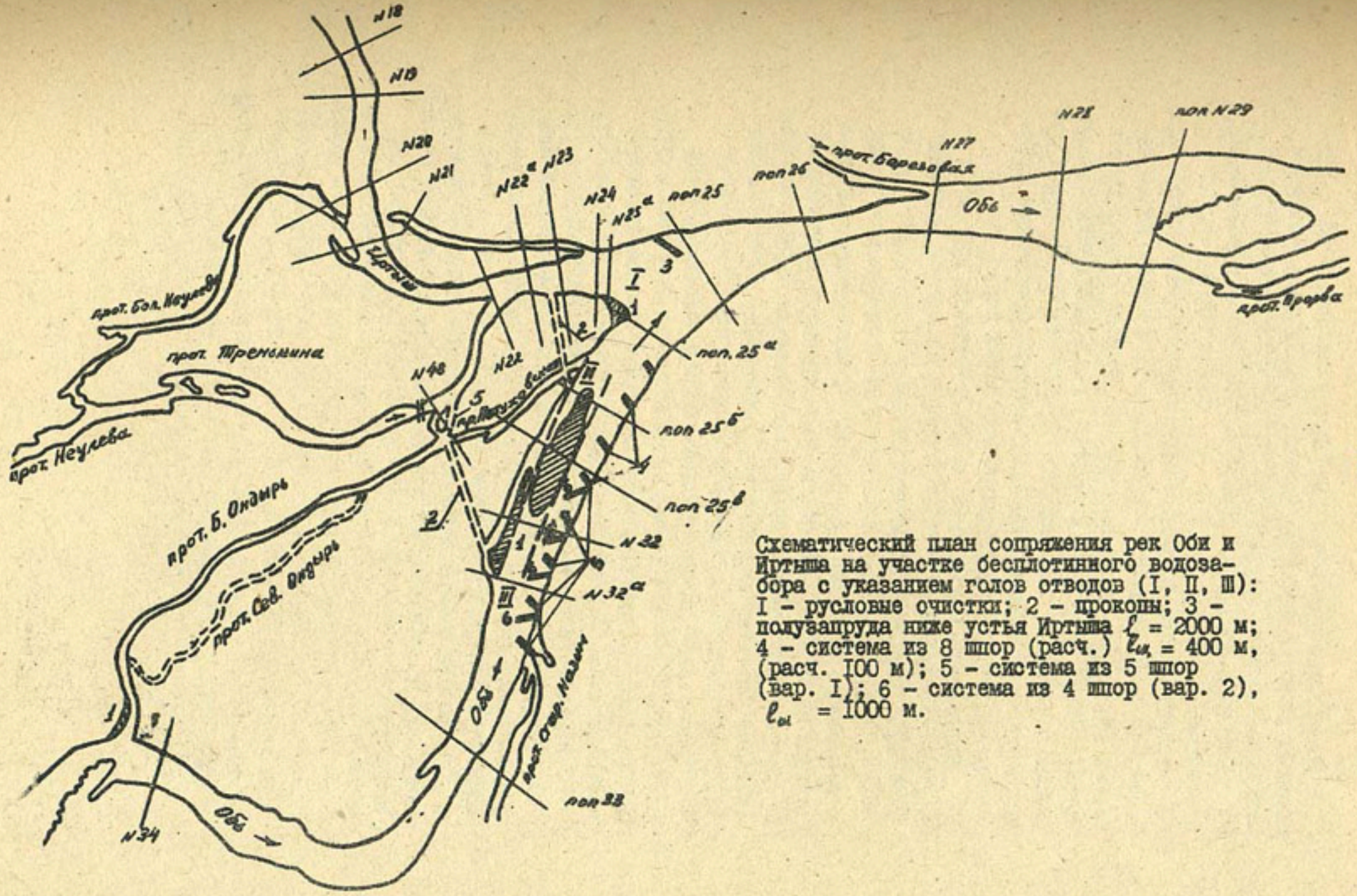
Предложенная схема водозабора "анти-Иртыш", регулирование русла Оби шпорами и различные прогнозные расчеты были подвергнуты детальной проверке на модели. Правомерность принятых масштабов модели подтверждена серией тарировочных опытов. На модели удалось получить подтверждение выбранной схемы бесплотинного водозабора в устье Иртыша с низовым входом и пропускной способностью русла "анти-Иртыш" при расчистке дна ее русла с учетом допустимой скорости и навигационных глубин (рисунок).

Подтверждена целесообразность применения ковшевого водозабора с низовым входом для борьбы с шугой и наносами. Выявлено, что эффективность работы ковшевого водозабора в устье Иртыша повышается при устройстве полузапруды длиной 2 км ниже устья реки. Установлен возможный характер деформации русла при водозаборе на участке расположения руслорегулировочных сооружений. На верхнем участке шпор происходит размыв дна, а на нижнем - отложение. На модели уточнена величина общего водозабора при совместной работе всех 3 голов отводов: 730 $м^3/с$ и количество шпор, необходимое для поддержания речного потока у голов отводов: 4 шт. длиной 1000 м под углом 70^0 против течения, расстояние между шпорами 1000 м.

Опытами на фрагменте модели с размываемым руслом удалось определить эффективность работы системы шпор. При прохождении паводковых расходов шпоры затапливаются и наблюдается отклонение поверхностных струй в сторону основного русла, создавая тем самым судоходные глубины.

Предлагаемая схема бесплотинного водозабора из р. Оби (одноголовый в устье Иртыша и многоголовый в других) с гидравлической точки зрения, удовлетворяет требования водозабора только лишь для I очереди переброски.

На основании проведенных опытов для II очереди переброски рекомендован бесплотинный водозабор с использованием голов проток Неулева, Ершина и других, расположенных на р. Оби на расстоянии 50 и 100 км выше устья Иртыша. Суммарный расход в них превышает 2400 $м^3/с$.



Схематический план сопряжения рек Оби и Иртыша на участке бесплотинного водозабора с указанием голов отводов (I, II, III): I – русловые очистки; 2 – прокопы; 3 – полузапруда ниже устья Иртыша ℓ = 2000 м; 4 – система из 8 шпор (расч.) $\ell_{ш}$ = 400 м, (расч. 100 м); 5 – система из 5 шпор (вар. I); 6 – система из 4 шпор (вар. 2), $\ell_{ш}$ = 1000 м.

Может быть предложен еще плотинный водозабор с подпором до отметки 20.20 м. Плотина должна быть разборной, наилучшим образом отвечать условиям судоходства, пропуску паводковых расходов, борьбе с наносами и шуголедовыми явлениями.

Водоподача из р. Оби в ГПК по схеме "анти-Иртыш" для I очереди обеспечивается через сложную систему ряда подпертых гидроузлов с насосными станциями на нижнем участке Иртыша. Ввиду трудности строительства и сложности эксплуатации в северных условиях при водоподаче в ГКП через Иртыш в качестве II варианта для I очереди предложена схема водоподачи через Левобережный Иртышский канал.

Максимальный водозабор в ЛИК определен 1000 $м^3/с$ для летнего периода, 572 $м^3/с$ для зимнего при расходах реки 5033 и 3579 $м^3/с$, соответственно.

В целях обеспечения бесперебойной водоподачи в ЛИК и уменьшения русловых деформаций, а также для создания условий по борьбе с наносами, шуголедовыми явлениями предложен многоголовый водозабор. Размеры водозаборных каналов, расположения их голов определены исходя из условий допустимой скорости и судоходных условий.

Определена пропускная способность анти-Иртыша на расход 230 $м^3/с$ и ЛИК на расход 572 $м^3/с$ в зимний период. Рекомендован новый шугозаградитель, с помощью которого можно защитить водозабор от поступления шуги и льда.

В дальнейших исследованиях следует уточнить:

- правомерность принятой величины коэффициента шероховатости, так как при расчете анти-Иртыша данный коэффициент принят из бытовых условий;

- расход донных наносов, что позволит иметь более потребное и точное представление о деформациях при водозаборе.

М.Р.КАРАПЕТЯН, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

А.Ю.ГОРСКИЙ
(Средазгидропроект им. С.Я.Жука)

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА НАНОСОВ р.АМУДАРЬИ НА РЕЖИМ НАНОСОВ КАРАКУМСКОГО КАНАЛА ПРИ БЕСПЛОТИННОМ ВОДОЗАБОРЕ

Каракумский канал является важнейшей водной артерией юга Туркмении. Отмечено, что пропускная способность его поэтапно возрастает и к настоящему времени достигла II млрд.м^3 в год при максимальном расходе 570 м^3/с.

Питание канала из реки обеспечивает многоголовый бесплотинный водозабор, являющийся самым верхним водозабором на левом берегу Амударьи (рис.I). Последние 7 лет из четырех голов работают три-II, III и IУ. Причем через IУ голову водозабор осуществляется только в период ноябрь-март, т.е. когда низкие горизонты в реке не обеспечивают требуемого забора воды в канал. Регулирование расхода воды производится двумя водозаборными сооружениями с расчетными расходами 350 и I70 м^3/с. Протяженность подводящих русл II и III голов на июль I980 г. Составила 4,8 км, IУ - 7 км, угол водозахвата равен I30÷I35^0 для II и III голов, 90^0 - для IУ.

Вместе с водой в канал поступает значительное количество донных и взвешенных наносов, которые во многом определяют характер процессов, протекающих в русле канала.

При бесплотинном водозаборе регулирование количества завлекаемых наносов в канал является весьма сложной задачей, особенно в условиях Амударьи с ее многорукавностью, легкоподвижным руслом, большими колебаниями горизонтов (до 2,5 м) и мутности воды (до I5 кг/м^3). Любые натурные исследования, направленные на установление взаимосвязи между источником (рекой) и потребителем (каналом), помогут найти общие закономерности распределения количества наносов, их состава,

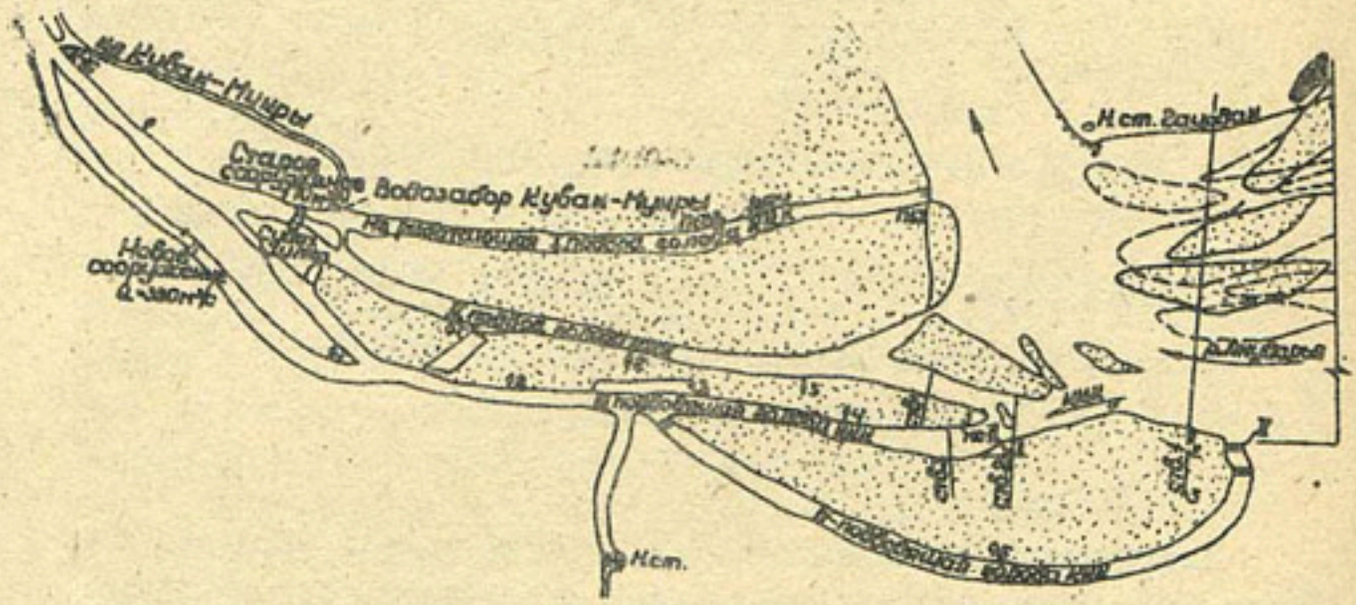


Рис.I. План-схема головного водозабора из р. Амударьи в Каракумский канал.

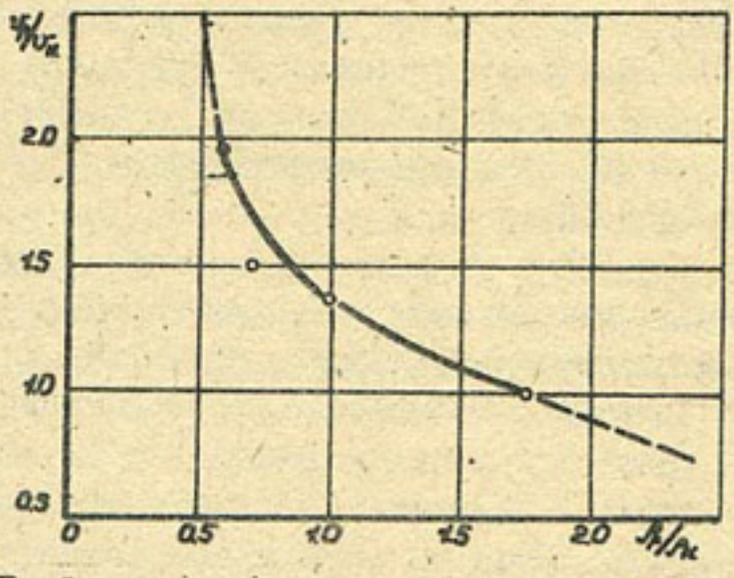


Рис.2. График зависимости отношения средних скоростей р.Амударьи и Каракумского канала от отношения их средних мутностей.

гидравлики потока в привязке к существующим условиям, которые воссоздать на модельных установках часто невозможно.

Выполненные отделом русл САНИИРИ в течение 1978–1980 гг. исследования на р.Амударье в районе водозабора в Каракумский канал (ККК) и в его подводящих руслах, имели своей целью установить связь между мутностями потока реки и канала, сопоставить фракционный состав взвешенных наносов, попадаемых в отстойники и выходящих из них. При этом важно определить, какой процент от взвешенных составляют донные наносы, выяснить характер распределения скоростей, глубин и мутностей по сечению реки и канала.

Для решения поставленных задач были выбраны три участка исследований (см.рис.I). Первый – участок р.Амударьи протяженностью 1600 м от створа I до I головы ККК. Расход воды в реке, горизонты, отбор мутности определялись в верхнем створе перед водозабором в канал. Второй участок – II и III головы Каракумского канала (IУ голова в период наблюдений не работала). Третий участок наблюдений – сооружение – регулятор с расчетным расходом 350 $м^3/с$. Измерения производились в верхнем створе на расстоянии от сооружения, обеспечивающем отсутствие зоны влияния кривой подпора – спада, и в нижнем бьефе – в зоне повышенной турбулентности, где взвешиваются и донные, и взвешенные наносы.

Расход воды измерялся пятиточечным способом, причем одновременно с замером скоростей вертушкой ГР-99 отбирались мутности батометром-бутылкой. В придонном слое проба отбиралась специальным приспособлением, позволяющим забирать мутность в точке, отстоящей от дна на расстоянии 5–6 см. Обработка данных съемок – общепринятая. Все виды съемок (измерение расхода, снятие горизонтов воды, промер глубин и т.д.) в реке и в канале проводили, по возможности, одновременно, но не более, чем за двое суток.

В течение наблюдаемого периода отмечались максимальные погонные расходы непосредственно у водозабора и доходили до 2I,2 $м^3/с/м$ против I,4 $м^3/с/м$ у правого берега. Здесь же сосредоточивались и максимальные мутности. На вертикали, расположенной в 40 м от левого берега, мутность в придонном слое в июле превышала 29 $кг/м^3$. У водозабора проходило до 75% рас-

хода воды с максимальной средней мутностью на вертикали до 10 кг/м^3.

В голове канала распределение погонных расходов воды и наносов более равномерна, чем в реке. Средние мутности на вертикалях в канале разнятся между собой незначительно и при сопоставлении с распределением наносов по вертикалям в реке выясняется, что в русле реки по глубине наносы распределяются более равномерно, что объясняется, возможно, тем, что в канале турбулентность потока по глубине развита более равномерно.

При сопоставлении средних мутностей потока, рассчитанных для всего сечения реки и канала (до отстойников) при одновременных замерах получается, что насыщение потока наносами в канале больше, чем в реке, несмотря на то, что скорости воды в канале меньше, чем в реке (табл.I). Мутности потоков выравниваются только при отношении скорости воды в реке $U_р$ к скорости в канале $U_к$, равном I,36 (рис.2).

Ограниченные исследования не позволяют делать обобщающих выводов; возможно, здесь сказывается различие в коэффициентах Шези и в характеристиках турбулентности. Натурные исследования показали, что при проектировании соединительных каналов или отстойников в расчетах принимать среднюю мутность в канале, исходя из средней мутности реки, рассчитанной для всего сечения потока, не совсем верно. На среднюю мутность потока в голове канала оказывает влияние мутность потока, протекающего вблизи водозабора, т.е. в зоне его влияния на речной поток. Получено, что зона влияния изменялась от I/6 B при расходах в реке более 4000 м^3/с до I/3 B при расходах менее I500 м^3/с (B–ширина реки по урезу воды). Более верным будет принимать в расчетах максимальное значение мутности, исходя из неблагоприятного (в смысле распределения мутности по сечению реки) протекания потока в районе водозабора. Как показали исследования, неравномерность распределения мутности в рассматриваемом створе реки составляла 2÷6.

Мутность, попадающая в канал ниже регулятора, зависит от эксплуатации последнего, горизонтов воды в реке и работы отстойников. При высоких горизонтах воды в реке регулятором создается кривая подпора в верхнем бьефе, и головы канала выполняют функции отстойников. Поток осветляется здесь в 2,5÷3 раза. Со снижением горизонтов воды в реке затворы регу-

Таблица I

Гидравлические элементы Амударьи и Каракумского канала (голова) за 1979 г.

Место замера	Дата замера	Q, м³/с	ω, м²	$h_{ср}$, м	h_{max}, м	$v_{ср}$, м/с	v_{max}, м/с	$\rho_{взв}$, кг/м³	P_g, %
Река	19 мая	1920	453	3,02	5,50	1,41	2,14	5,62	
Канал	20 мая	340	247	1,51	3,1	0,91	1,61	8,07	
Регулятор НБ	19 мая							3,47	21,4
Регулятор ВБ	19 мая							2,86	
Река	24 июня	5649,6	1808	2,24	6,60	1,39	2,09	3,73	
Канал	23 июня	640	301	1,81	5,95	1,17	1,64	3,72	
Регулятор НБ	23 июня							1,53	3,43
Регулятор ВБ	23 июня							1,12	
Река	27 июля	5414	1048	2,28	8,20	2,24	2,9	2,64	
Канал	26 июля	575	288	1,71	3,90	1,17	1,39	4,52	
Регулятор НБ	26 июля							2,61	
Регулятор ВБ								2,16	20,9
Река	4 сентября	2695	748	3,1	6,60	1,10	1,98	1,87	
Канал	2 сентября	267	80	2,8	4,98	1,10	1,63	1,18	
								2,99	10,8
								2,70	

Примечание. Здесь приведены наиболее характерные расходы воды для данного месяца.

лятора приподнимаются, кривая подпора уменьшается, а в меженный период щиты полностью открыты и здесь наблюдается кривая спада. Уклоны в подводящих головах в это время увеличиваются до 0,00030, происходит смыв призмы отложений и мутность потока за регулятором больше мутности в реке и в канале перед отстойниками (см.табл.I, сентябрь).

Фракционный состав взвешенных наносов в реке и в голове канала до отстойников идентичен (таол.2), а за отстойниками средний диаметр их в 2÷5 раз меньше, т.е. в отстойниках происходит отложение частиц крупнее 0,05 мм. Содержание крупных частиц $d > 0,1$ мм в составе взвешенных наносов в голове ККК в 2÷5 раз меньше, чем за отстойниками, а максимальная крупность их здесь в 2÷4 раза меньше. Фракционный состав наносов и в реке, и в канале колеблется в больших пределах. Наибольшим колебаниям подвержены частицы $d >$ 0,05 мм, наименьшему – d = 0,05÷0,01 мм. В половодье средняя крупность

Таблица 2

Крупность взвешенных наносов Амударьи и Каракумского канала за 1980 г.

Месяц	Место отбора пробы	Экстремальные значения	Состав фракции, %			$d_{ср}$
			>0,05	0,05–0,01	<0,01	
Май	Амударья	макс.	34,8	31,6	33,6	0,052
		мин.	35,85	25,30	28,30	0,038
	Канал (голова)	макс.	53,20	20,10	26,70	0,055
		мин.	30,36	26,04	43,60	0,035
Июль	Амударья	макс.	45,94	33,40	20,66	0,099
		мин.	15,64	52,45	31,91	0,030
	Канал (голова)	макс.	65,75	22,46	11,79	0,182
		мин.	13,69	55,01	31,30	0,030
	Нижний бьеф регулятора	макс.	52,64	31,36	16,00	0,050
		мин.	19,94	49,42	30,64	0,030
Октябрь	Амударья	макс.	60,08	28,05	11,87	0,130
		мин.	59,67	25,96	14,37	0,060
	Голова канала	макс.	74,07	16,80	9,10	0,170
		мин.	24,90	27,08	48,02	0,030

Нижний бьеф регулятора	макс.	64,92	24,20	I0,88	0,059
	мин.	27,60	4I,30	3I,I0	0,036

частиц в реке и в канале меньше, чем в межень (табл.2), но за отстойниками эти колебания более сглажены. Процентное содержание донных наносов от взвешенных составляет, по нашим наблюдениям, от 3 до 5I%, больший процент соответствует осенне-зимнему периоду, меньший - весенне-летнему.

В связи с отсутствием достаточного количества натурных данных по изучению наносов в придонном слое в настоящее время при расчетах отстойников этот процент находят из осредненных цифр, рекомендуемых в литературе - 8-I2%. Проведенные исследования показали, что, по крайней мере, на Амударье эта цифра должна быть подвержена ревизии, для чего необходимо продолжить изучение донных наносов и накапливать данные по их движению в натурных условиях. Кроме того, дальнейшими вопросами исследований в плане рассматриваемой здесь задачи взаимодействия режима наносов реки и канала при бесплотинном водозаборе являются изучение характеристик турбулентности потока и его сопротивлений.

Х.И.ЗАИРОВ, канд.техн.наук
П.П.ЛИСТРОВОЙ канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

ГАСИТЕЛИ КРУТЫХ ВОЛН ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЛЯ КРУПНЫХ МАШИННЫХ КАНАЛОВ

Опыт эксплуатации крупных машинных каналов (Каршинского, Аму-Бухарского, Иртыш-Караганда и др.) показывает, что на насосных станциях практически ежедневно, а иногда и по несколько раз, производятся пуски и остановки гидроагрегатов. Также весьма часты аварийные ситуации, когда по разным причинам одновременно отключаются все работающие насосы. Например, на Каршинском магистральном канале за вегетационный пе-

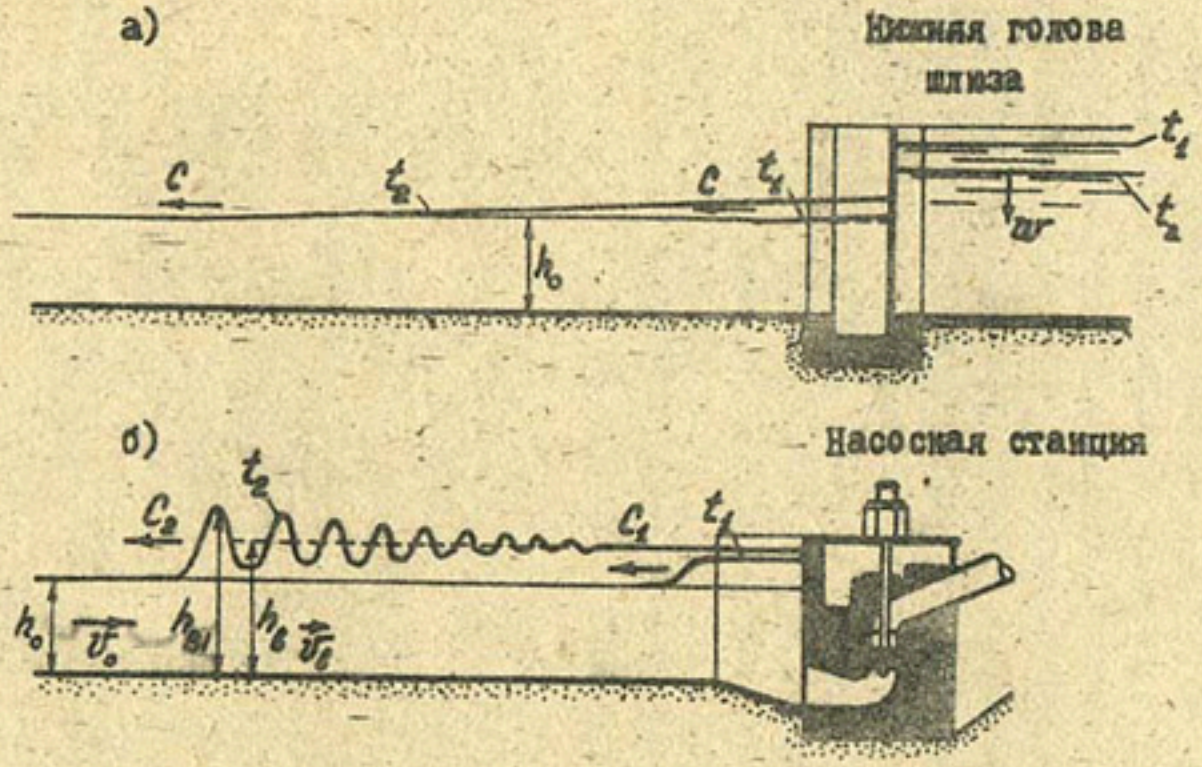


Рис. I. Положительные волны перемещения: а-пологая в подходном канале судоходного шлюза; б-крутая в подводящем канале насосной станции.

риод 1978г. было 26 остановок отдельных станций и всего каскада в целом. Аналогичного положения следует ожидать и при эксплуатации насосных станций Главного канала переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан.

При пусках и остановках гидроагрегатов на насосной станции изменяется расход воды, и в результате в машинном канале возникают волны перемещения. При медленном изменении расхода, например, в нижнем подходном канале судоходного шлюза при опорожнении камеры образуются пологие волны перемещения, представляющие собой движущееся по каналу повышение уровня воды (рис. 1а; моменты $t_1 < t_2$).

В машинных каналах вследствие быстрого (за 5-10 с) изменения расхода воды, причем сразу на величину производительности одного или даже группы насосов, образуются крутые волны перемещения, лобовая часть которых (передняя часть волны, примыкающая к ее фронту) представляет собой цепь следующих друг за другом гребней вторичных волн или ондуляций /1,2/. В процессе движения волн по каналу наблюдается развитие ондуляций, сопровождающееся увеличением крутизны и ростом числа их гребней (рис.1б; моменты $t_1 < t_2$).

Высота гребней ондуляций ($h_{в1} - h_0$) может более чем в два раза превышать среднюю высоту лба волны ($h_в - h_0$)и достигать 20-25% от первоначальной глубины невозмущенного потока (см.рис.1б). После достижения первым гребнем $h_{в1}$ максимальной высоты (так называемая стадия "сформировавшихся волн") начинается процесс затухания вторичных волн, протекающий очень медленно, поэтому фронт волны распространяется по каналу на расстояния, измеряемые десятками километров. Развитие вторичных волн сопровождается изменением скоростной структуры потока в волне. Траектории движения частиц воды имеют вид эллиптических трохоид. Причем их скорость в гребнях в несколько раз больше, а во впадинах соответственно меньше средней скорости потока $v_в$.

Перечисленные особенности лобовой части крутых волн перемещения обуславливают целый ряд дополнительных воздействий на канал и сооружения. Натурные исследования на Каршинском магистральном канале показали, что наличие вторичных волн приводит к переливу воды через бермы до переполнения канала, вызывает разрушение облицовки и размыв незащищенных откосов.В этом же канале между насосными станциями № 2 и 3(рас-

стояние 900 м) крутизна образующихся волн определяет значительное динамическое воздействие на водовыпускное сооружение станции № 2. Расчеты показали, что величина дополнительного бокового давления на водовыпуск достигает 65% от нормальной гидростатической нагрузки. В судоходных машинных каналах волны перемещения представляют опасность для плавающих и пришвартованных судов.

Для защиты машинного канала, сооружений и судов от воздействия крутых волн перемещения необходим комплекс специальных мероприятий. Это могут быть мероприятия "пассивного" характера, направленные на приспособление конструкции канала и сооружений к восприятию дополнительных нагрузок (повышение запасов дамб, крепление откосов, повышение устойчивости сооружений и др.), а также "активные", направленные на создание специальных сооружений (гасителей), препятствующих возникновению и развитию крутых волн перемещений в канале[x]. Подобные сооружения должны обеспечивать: гашение ондуляций, снижение высоты лобовой части волны и уположение волнового фронта.

Сооружения для гашения волн перемещения известны и используются на деривационных каналах ГЭС и в подходных каналах судоходных шлюзов. Рассмотрим ряд конструкций таких гасителей, с точки зрения возможности их применения для машинных каналов.

Боковые уширения русла (рис.2,а) используются иногда в нижних подходных каналах судоходных шлюзов для уменьшения высоты волн перемещения /3/. В этом случае снижение высоты волны является следствием ее частичного отражения от устья уширения и вниз по каналу распространяется преломленная волна /4/. Использование подобного уширения для частичного снижения высоты крутых волн в машинных каналах принципиально возможно, но при этом не обеспечивается уположение лба волны. Кроме того, резкое увеличение сечения канала недопустимо при наличии в воде наносов, так как местное падение скоростей потока вызовет их оседание и аккумуляцию.

Более широкое применение в шлюзовых каналах нашли гасители, разработанные В.А.Раевым /5/. Они представляют собой открытые емкости (бассейны), соединяемые с каналом протокой или

---

[x] Воздействие на параметры волн путем более плавного управления режимом работы насосных агрегатов в статье не рассматривается.

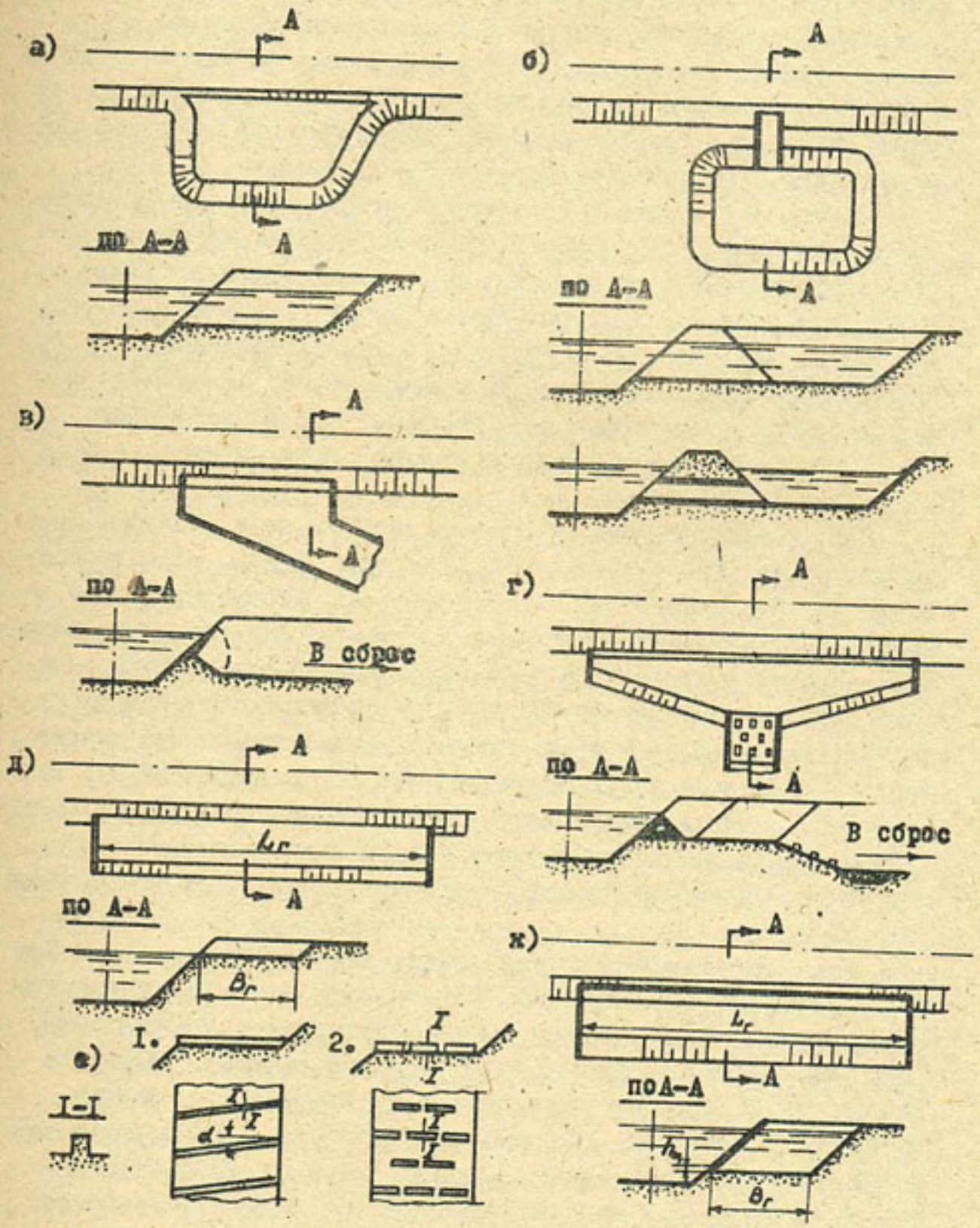


Рис. 2. Гасители положительных волн перемещения: а – боковые уширения; б – емкости, соединяемые с каналом: I) протокой или 2) трубой; в – боковой водосброс с клапанным затвором; г – боковой водослив; д – гаситель бокового типа; е – то же, с дополнительными гасящими элементами: I) стенками, 2) шашками; ж – гаситель щелевого типа.

трубой (рис.2,б)[x]. Изменение уровня при движении волн перемещения вызывает переток воды между каналом и емкостью, что в случае пологой волны приводит к ее снижению. Устройство такого гасителя в машинном канале мало повлияет на параметры лобовой части волны, так как фронт крутой волны пройдет мимо устья протоки прежде, чем начнется переток воды в емкости.

Сбросные сооружения деривационных ГЭС оборудуются клапанными (рис.2,в) или другими быстродействующими затворами для уменьшения крутых волн перемещения, образующихся при быстрых изменениях нагрузки /6/. Они компенсируют изменение расхода воды, пропускаемого через турбины, путем соответствующего регулирования сбросного расхода. В отличие от ГЭС аванкамеры насосных станций, как правило, располагаются в глубокой выемке, поэтому организация сброса воды из канала затруднительна и экономически не оправдана.

Использование длинных боковых водосливов с отметкой порога на уровне воды в канале (рис.2,г) для гашения волн перемещения связано с подобными же трудностями. Сброшенную через водослив воду приходится отводить в пониженные места или закачивать обратно в канал, для чего необходим дополнительный комплекс гидротехнических сооружений (отводящий тракт, сопрягающие сооружения и т.д.). В то же время большая длина водосливного фронта эффективно воздействует на параметры лобовой части крутых волн. Такой водослив длиной 457 м, сооруженный в подводящем канале насосной станции, подающей воду из канала Дельта-Мендота в водохранилище Форбей, уменьшает высоту волн почти в два раза /7/.

Перечисленные недостатки известных гасителей потребовали для условий крупных машинных каналов разработки новых конструкций. Для защиты Каршинского канала, где высота гребней волн, образующихся при остановке всей насосной станции, достигает на откосах 2,2 м, был разработан волногаситель так называемого бокового типа /8/. Гаситель представляет собой длинные боковые "карманы", устраиваемые симметрично по обоим берегам канала на подходе к насосной станции (рис.2,д). Дно карманов

---

[x] Боковые уширения можно рассматривать как частный случай этих гасителей.

выполняется на отметке максимального стационарного уровня воды и имеет небольшой наклон ($i \approx 1\%$) в сторону русла канала. Как видно, в пределах гасителя резко увеличивается сечение канала, занятое волной, что приводит к ее распластыванию в продольном и поперечном направлениях. Более интенсивному гашению волн способствуют дополнительные гасящие элементы, которые можно располагать на дне карманов (рис.2,е).

Другой тип гасителя был разработан для машинных каналов, в которых в процессе эксплуатации наблюдается значительное колебание уровня воды. Примером такого канала является Главный канал переброски части стока сибирских рек, где разница уровней воды летом и зимой в соответствии с проектом будет достигать 4 м. Очевидно, гаситель бокового типа не может обеспечить одинаковую эффективность работы при всех изменениях наполнения канала. Предложенный нами щелевой гаситель /9/ представляет собой длинную открытую емкость, отделенную от канала продольной стенкой с отверстием (щелью) в нижней части (рис.2,ж). В отличие от гасителей, показанных на рис. 2,б, эта конструкция обеспечивает длительное воздействие на лобовую часть волны в течение всего времени ее движения вдоль щели[x]. Затруднения с использованием этого гасителя могут возникнуть при наличии в воде взвешенных наносов, так как они будут отстаиваться в емкостях и забивать щели, что потребует периодической промывки.

Поскольку в настоящее время не существует методов гидравлического расчета сооружений аналогичных предложенным гасителям, оценка эффективности их работы и определение зависимостей между основными размерами конструкций и степенью воздействия на параметры волн было выполнено путем модельных исследований.

Исследования проводились на жестких моделях участков машинных каналов, примыкающих к насосной станции, с аванкамерами. Моделирование начальных условий и выбор масштаба моделей осуществлялись по выбранной методике с использованием критериев подобия Фруда и Рейнольдса. Соответствие граничных условий волнообразования на моделях условиям машинных каналов в натуре оценивалось предложенным нами безразмерным параметром F_Δ /2/. Параметры волн записывались на оси канала и на откосах в нескольких створах по всей длине модели. Количественная оценка

---

[x] На этот тип гасителя получено положительное решение по заявке на изобретение.

работы волногасителей производилась по показаниям датчиков, расположенных в непосредственной близости от него. На рис. 3 представлены волнограммы одной и той же волны на подходе к гасителю и после прохождения его, полученные в одном из опытов. Из указанных на рисунке параметров волны были составлены следующие безразмерные показатели:

а) коэффициент уменьшения высоты волны, показывающий снижение в пределах гасителя максимальной высоты волны

$$\mathcal{E} = y_{max}/x_{max} \quad ;$$

б) коэффициент уположения фронта волны, определяющий крутизну волнового фронта на выходе из гасителя

$$\mathcal{H} = y_c^2/x_c \cdot \Delta t_y \sqrt{g h_{cp}} \quad ,$$

где g – ускорение свободного падения.

В проведенных опытах изменялись длина и ширина карманов и емкостей, высота щели $h_щ$ и другие параметры гасителей.

Для гасителя бокового типа были рассмотрены два варианта его расположения: непосредственно у аванкамеры насосной станции и на участке канала, где завершалось формирование волны (расстояние от аванкамеры $S_г = 75\ h_{cp}$, где h_{cp} – средняя гидравлическая глубина трапецеидального русла).

В качестве примера рассмотрим основные результаты опытов с гасителем бокового типа. Здесь происходит полное разрушение вторичных волн при суммарной площади дна карманов $\Omega_г = 80\,\omega_0$ (ω – площадь живого сечения потока в канале) независимо от соотношения его длины и ширины, а также местоположения гасителя. Дальнейшее увеличение размеров карманов приводит все к большому уположению фронта волны за гасителем.

На рис.4 приведены графики зависимостей значений показателей гашения $\mathcal{H}$ и $\mathcal{E}$ от приведенной длины $l_г = L_г/h_{cp}$ и ширины $b_г = B_г/B_0$ кармана (B_0 – ширина свободной поверхности потока в канале).

Графики показывают, что при расположении гасителя у аванкамеры на уположение фронта волны при длине кармана до $l_г = 115$ значительно влияет только ширина $b_г$. И лишь дальнейшее увеличение длины до $l_г = 149$ приводит к резкому повышению эффективности работы гасителя (см.рис.4, пунктирные линии). Когда же начало гасителя отстоит от насосной станции на расстояние $S_г = 75\ h_{cp}$ эффективность гашения сначала выше, чем при

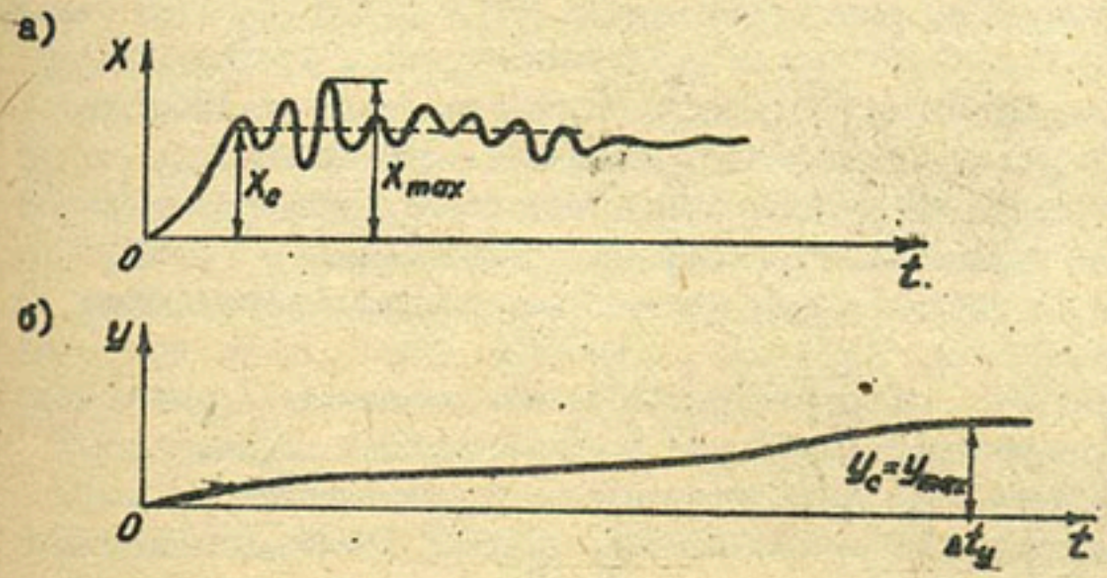


Рис. 3. Вид волнограмм: а) на входе и б) на выходе гасителя.

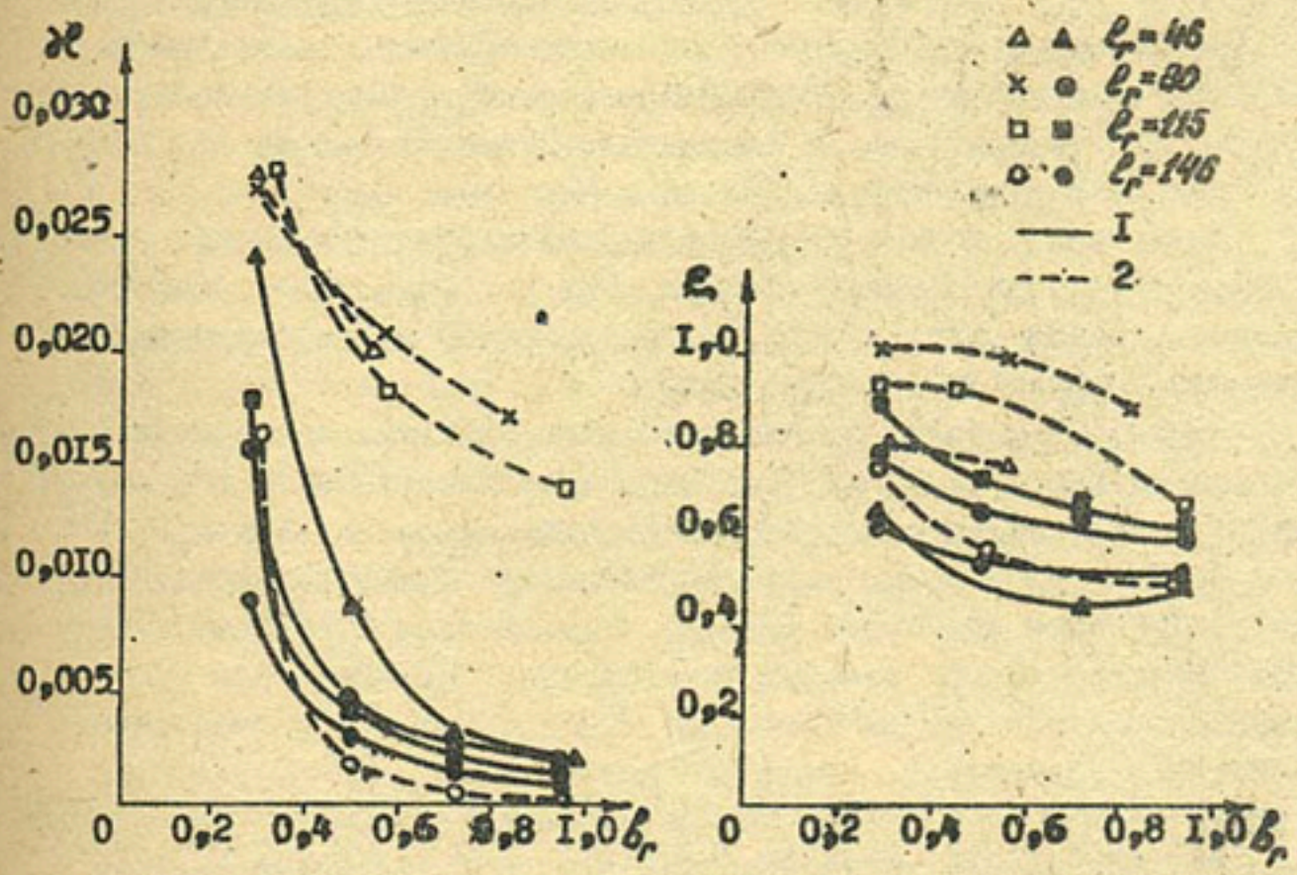


Рис. 4. Зависимость параметров $\mathcal{X}$ и ξ от размеров и расположения гасителя бокового типа: I – гаситель перед насосной станцией; 2 – гаситель на расстоянии ℓ_r =75.

$S_г = 0$, при $b_г < 0{,}7$ зависит как от ширины, так и от длины гасителя. Дальнейшее увеличение размеров гасителя меньше влияет на величину $\mathcal{H}$.

Как видно, графики зависимостей $\mathcal{H} = \mathcal{H}(b_г, l_г)$ не имеют экстремума, а асимптотически приближаются к оси абсцисс. Поэтому не существует оптимальных размеров гасителя, так как увеличение его размеров улучшает гашение. Следовательно, для назначения размеров конструкции для конкретного машинного канала должен быть установлен необходимый уровень гашения. Решение этого вопроса само по себе представляет сложную самостоятельную задачу.

Что касается снижения гасителем максимальной высоты волны (см.рис.4; зависимость $\mathcal{E} = \mathcal{E}(b_г, l_г)$, то при исследованных размерах гасителя не было достигнуто значения параметра $\mathcal{E} < 0{,}45$. Таким образом, модель показала, что фактически гаситель не дает уменьшения высоты волнового фронта более чем в два раза.

Полученные эмпирические зависимости позволили назначить параметры гасителя бокового типа для Каршинского магистрального канала, строительство которого намечено осуществить в 1982 г. Гаситель с карманами длиной 500 м и шириной 16 м должен обеспечить, при полном гашении ондуляций, снижение высоты лба волны в два раза и уположение фронта волны около 20 раз.

Аналогичный подход был использован нами и при исследовании параметров гасителя щелевого типа. Они показали, что щелевой гаситель трансформирует лобовую часть крутой волны перемещения аналогично гасителю бокового типа.

Выполненные исследования позволили определить основные требования, которым должна отвечать конструкция гасителей крутых волн перемещения для условий крупных машинных каналов.

1. Гасители должны иметь значительную длину в направлении распространения волнового фронта, чтобы обеспечить достаточное время воздействия на лобовую часть волны. Например, для уположения фронта волны до значения $\mathcal{H} \leq 0{,}005$, при расположении гасителя у аванкамеры, его длина должна быть $L_г \geq 125\, h_{ср}$, а при воздействии гасителя на сформировавшиеся волны ($S_г = 75 h_{ср}$) тот же уровень гашения достигается при несколько меньшей длине $L_г \geq 80\, h_{ср}$.

2. Гасители должны иметь сообщающиеся с каналом емкости

для размещения части объема воды, образующегося от распространения волн перемещения . При этом для полного гашения ондуляций площадь этих емкостей должна быть $\Omega_г > 80\,\omega_0$. Для достижения значения $\varkappa \leq 0{,}005$ ширина каждой емкости должна быть $B_г > 0{,}4\,B_0$.

3. Располагая в емкостях дополнительные элементы, играющие роль гидравлических сопротивлений и препятствующие развитию и распространению волн внутри гасителя (см.рис.2,е), можно в I,5–2 раза повысить эффективность гашения волн при тех же размерах гасителя. Увеличение гидравлического сопротивления проточной части должно приводить к большему уположению фронта волны (например, в щели гасителя,см.рис.2,ж).

4. Конструкция гасителя не должна нарушать гидравлику стационарного течения воды в канале. С этой точки зрения показательным является гаситель бокового типа.

5. Конструкция гасителя должна быть такой, чтобы исключить при аварийных остановках насосных станций холостые сбросы воды из канала.

В заключение считаем необходимым отметить, что задачи проектирования и эксплуатации больших каскадов насосных станций, таких, например, как Главный канал переброски части стока сибирских рек, вызывает необходимость более детального изучения описанных гасителей, как одного из эффективных способов защиты машинных каналов от воздействия крутых волн перемещения. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование конструкции и разработку методов гидравлического расчета разных типов волногасителей. Особую важность, с точки зрения проектирования гасителей, представляет установление для каждого конкретного канала необходимого уровня гашения крутых волн перемещения, т.е. допустимых значений основных параметров волн, безопасных, например, для русл,сложенных из мелкопесчаных несвязанных грунтов, или судоходства.

Литература

I. Заиров Х.И., Листровой П.П. Натурные исследования волн перемещения. Сб.научных трудов, вып, I47 САНИИРИ, Ташкент, I975.

2. Заиров Х.И., Листровой П.П. Волны перемещения в Каршинском магистральном канале и способ их гашения. Докл. ВАСХНИЛ, I979, № 2.

3. Баланин В. Гашение волн в нижних подходных каналах шлюзов. "Речной транспорт", 1962, № 2.

4. Онипченко Г. Гашение волн в нижних подходных каналах шлюзов. Речной транспорт, 1962, № 10.

5. Раев В.А. Регулирование волновых колебаний в судоходных каналах. В кн.: "Порты и гидротехнические сооружения". Труды ЛИВТ, М.-Л., "Транспорт", 1964, вып. 78.

6. Гидроэлектрические станции. Под ред. Ф.Ф. Губина, М., "Энергия", 1972.

7. Вагнер У., Кинг Д.Л. Волны в подводящем трапецеидальном канале, вызванные внезапной остановкой насоса. XI конгресс МАГИ, Л., 1965, докл. Ш-18 (на англ.языке).

8. Листровой П.П. Новый гаситель крутых волн перемещения для машинных каналов. "Изв. АН УзССР", сер.техн.наук, Ташкент, 1978, № 5.

9. Листровой П.П., Садыков Ш.Ю. Исследование и расчет щелевого волногасителя для машинных каналов. "Тезисы докл. Респ.науч.-техн.конференции молодых ученых", Ташкент, 1981.

К.И.БАЙМАНОВ
(САНИИРИ им.В.Д.Журина)

О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ В КАНАЛАХ НИЖНЕ-АМУДАРЬИНСКИХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Оросительные системы низовий Амударьи, в частности Каракалпакии, получают воду из реки с большим содержанием мелкопесчаных наносов, из которых 10% составляют крупные частицы, перемещающиеся по дну или в придонном слое. Основная масса наносов движется во взвешенном состоянии. Однако во внутригодовом и многолетнем разрезе количество и фракционный состав наносов, поступающих в каналы, постоянно изменяются. Это связано прежде всего с изменением мутности и состава речных наносов. В период весеннего половодья и особенно во время дождевых пиков мутность речной воды резко возрастает за счет смыва мелкозема с поверхности нижнего яруса гор на ее водосборе, средняя крупность наносов при этом соответственно уменьшается. В период летнего половодья, формирующегося на верхнем ярусе гор, бедном мелкоземом, мутность уменьшается, а крупность наносов увеличивается. Наименьшая мутность и соответственно наибольшая крупность наносов наблюдаются в межень, когда река насыщается наносами преимущественно за счет русловой эрозии. Сильные изменения мутности и состава наносов происходят и в многолетнем разрезе в связи с изменением водности отдельных лет (хотя проявляющаяся при этом связь недостаточно тесна). Большое влияние на изменение количества и состава наносов, поступающих в каналы, оказывают условия водозабора.

При бесплотинном водозаборе интенсивное блуждание реки перед головой канала может приводить к интенсивному забрасыванию ее наносами, причем зарегистрирован даже случай проникания достаточно крупных песчаных гряд в каналы. Немного лучше обстоит дело и в случае приплотинного водозабора. Шестилетний опыт эксплуатации Тахиаташской плотины показывает, что значительное закрытие щитов плотины после прохождения паводковых пиков вызывает сильное осаждение наносов в подводящем русле гидроузла, что, в свою очередь, приводит к поступлению в каналы Кызкеткен и им.Ленина переосветленной воды, содержащей очень мелкие наносы. Наоборот, быстрое открытие щитов плотины для пропуска очередного пика паводка вызывает интенсивный размыв отложений, образовавшихся в подводящем рус-

ле. Причем значительная часть продуктов этого размыва завлекается в каналы, сильно повышая мутность подаваемой воды и среднюю крупность поступающих наносов. Некоторое сглаживающее влияние на описанные неравномерности оказывают отстойники, устраиваемые в головах магистральных каналов.

Механизированная очистка отстойников организуется из условия возможно более равномерной загрузки землесосов без учета поступления наносов в голову канала. Это приводит к тому, что в периоды слабого поступления наносов через голову канала из отстойника поступает переосветленная вода и, наоборот, в периоды интенсивного завлечения наносов вода остается перенасыщенной наносами.

Все сказанное относится прежде всего к магистральным каналам оросительных систем. Что же касается ветвей и распределительной сети, то их насосный режим может существенно изменяться еще и от условий вододеления. Причем в малые отводы, осуществляющие боковой водозабор, наносы чаще завлекаются, чем в более крупные, или переходят транзитом вниз по течению Главного канала.

Таким образом, для каналов нижнеамударьинских оросительных систем можно считать характерной работу при переменном наносном режиме. Такая работа приводит к тому, что нагрузка потока воды в канале не всегда равна его транспортирующей способности. В одни периоды она больше, и тогда в канале происходит отложение избытка наносов, образующее различные формы наносных отложений. В другие периоды нагрузка меньше транспортирующей способности и происходит размыв образовавшихся отложений, который может распространиться даже на грунт первоначального (строительного) ложа канала. Образование наносных отложений или размыв русла могут существенно изменять гидравлические сопротивления движению потока воды, а следовательно и скорость течения, и наполнение канала (при заданном расходе) или расход воды в канале (при поддержании заданного уровня воды в нем). Поэтому правильный учет этого изменения представляет большой практический интерес для эксплуатации оросительных систем низовий Амударьи.

В настоящее время в теоретических работах гидравлическое сопротивление трению оценивают с помощью безразмерного коэффициента гидравлического трения "λ", связанного с общеизвестным коэффициентом Шези "C" выражением

$$\lambda = \frac{2g}{C^2}. \qquad (I)$$

Однако в практике инженерных гидравлических расчетов каналов обычно используется так называемый коэффициент шероховатости "n", связанный с коэффициентом Шези различными эмпирическими формулами. Наиболее точной из них считается формула Н.П.Павловского

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{y}, \qquad (2)$$

где R - гидравлический радиус;

y - показатель степени, вычисляемый по эмпирической формуле, учитывающий "R" и "h" (при расчетах каналов часто принимают $y = \frac{1}{6}$, что в свое время было предложено Р.Маннингом).

Для определения значений коэффициента шероховатости "n" в справочной литературе приводятся таблицы, по которым эти значения выбираются в зависимости от словесной характеристики грунтов ложа канала или материала его облицовки. Для несвязных песчаных и гравелистых грунтов, при отсутствии подвижки частиц, значения "n" могут спределяться по формулам Чанга и других авторов. Однако указанные таблицы и формулы не учитывают руслового процесса, связанного с описанным выше переменным наносным режимом при работе каналов.

В каналах амударьинских оросительных систем за счет мелких песчаных отложений выравниваются мелкие неровности ложа, что вызывает уменьшение коэффициента шероховатости. Особенно сильно этот коэффициент уменьшается, если поверхность отложений покрывается тонкой илистой пленкой (экланом). Кроме сказанного, интенсивное осаждение песчаных наносов уменьшает интенсивность турбулентности, вследствие чего градиенты скорости в придонной области уменьшаются и придонная мутность увеличивается. В результате этого на поверхности отложений образуется грязевой слой, сильно насыщенный наносами по типу плотного (тяжелого) потока, наблюдавшегося в водохранилищах, который имеет вязкость, в два и более раз превышающую вязкость чистой воды, и движется под действием силы тяжести по самостоятельным законам. Образование такого слоя наблюдалось нами при проведении полевых исследований на канале Кызкеткен, причем содержание наносов в нем достигало 525 г/л на высоте 5 см от дна и 462 г/л на высоте 10 см, тогда как уже на высоте 30 см от дна

оно уменьшалось до 3,12 г/л.

Способность указанного слоя к самостоятельному движению вниз по уклону приводит к ослаблению тормозящего влияния русла на основной поток, поскольку это влияние будет определяться не скоростью течения потока, а разностью между этой скоростью и скоростью движения придонного грязевого слоя. Наоборот, при размыве русла придонний грязевой слой разрушается и исчезает, а интенсивность турбулентной пульсации возрастает, вызывая взвешивание наносов, смываемых с поверхности отложений. Это увеличивает затраты энергии, а следовательно и гидравлическое сопротивление движению потока. Кроме того, поверхность отложений при размыве покрывается рядом неровностей, представляющих собою так называемые микроформы русловых образований (рифели), с увеличением высоты которых шероховатость русла значительно повышается. Продолжение размыва до полного смыва образовавшихся ранее в канале отложений, как правило, не вызывает уменьшения шероховатости, так как такой размыв вследствие неоднородности грунтов ложа каналов обычно приводит к образованию различных по форме и размерам вымоин и других неровностей.

Для подтверждения всего сказанного на рис.1,2 и 3 приводятся графики изменения коэффициента шероховатости "n" в зависимости от гидравлического радиуса канала "R" и числа Рейнольдса Re, построенные по данным многочисленных натурных измерений, произведенных нами на крупных каналах оросительных систем Каракалпакии. На этих графиках сплошной линией показаны эмпирические кривые $n = f(R)$ и $n = f(Re)$, проведенные через группу натурных точек, отвечающих "критическому наносному режиму", при котором нагрузка потока наносами равна его транспортирующей способности (эти точки обозначены буквой "К" в середине).

Как следует из рис.1 и 2, значительная часть натурных точек располагается выше или ниже указанной сплошной линии, причем точки, расположенные выше, соответствуют режиму размыва, а расположенные ниже - режиму заиления.

Таким образом, размыв русла канала в условиях Каракалпакии может увеличить коэффициент шероховатости "n" в 1,5 раза и более. Заиление же канала, наоборот, уменьшает коэффициент шероховатости в 1,5–2 раза.

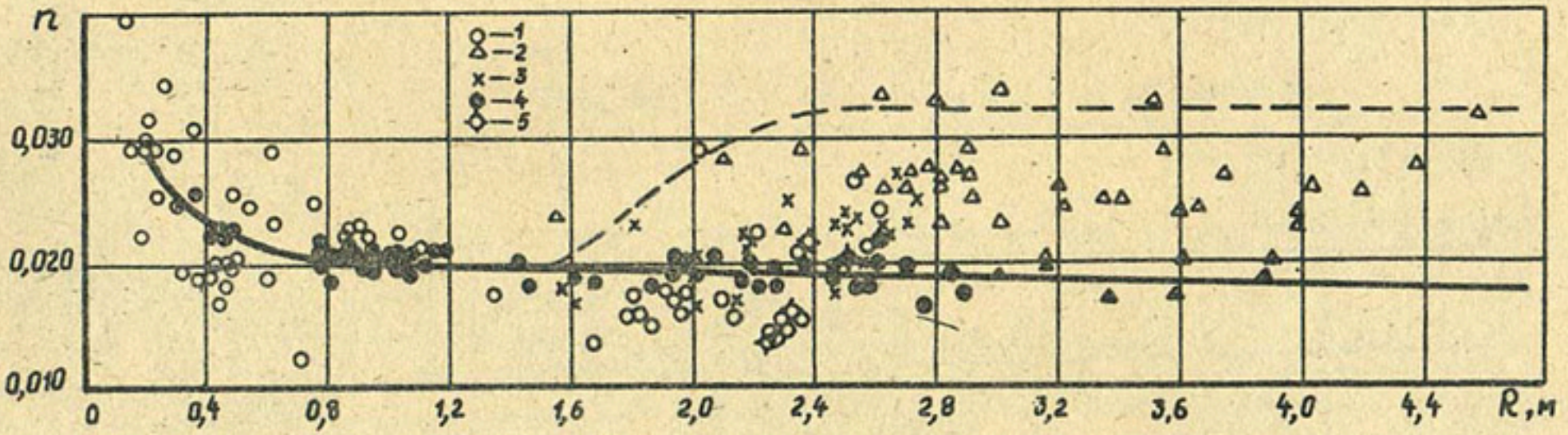


Рис.I. Зависимость коэффициента шероховатости русл от гидравлического радиуса: I - каналы Кызкеткенской оросительной системы (I952-I953 гг.); 2 - канал Кызкеткен (I975-I978 гг.); 3 - канал им. Ленина (I976-I978 гг.); 4 - канал Куванишджарма (I978 г.); 5 - канал Кегейли (I976-I978 гг.).

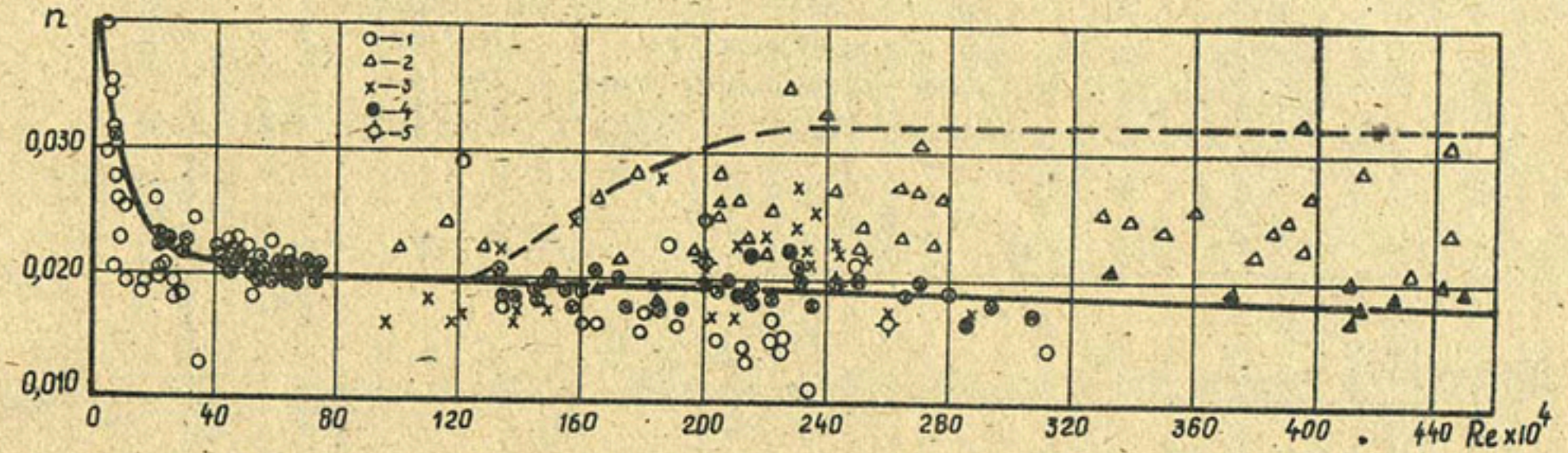


Рис.2. Зависимость коэффициента шероховатости русл " n " от числа Рейнольдса Re : I,2,3,4,5 - то же, что и на рис.I.

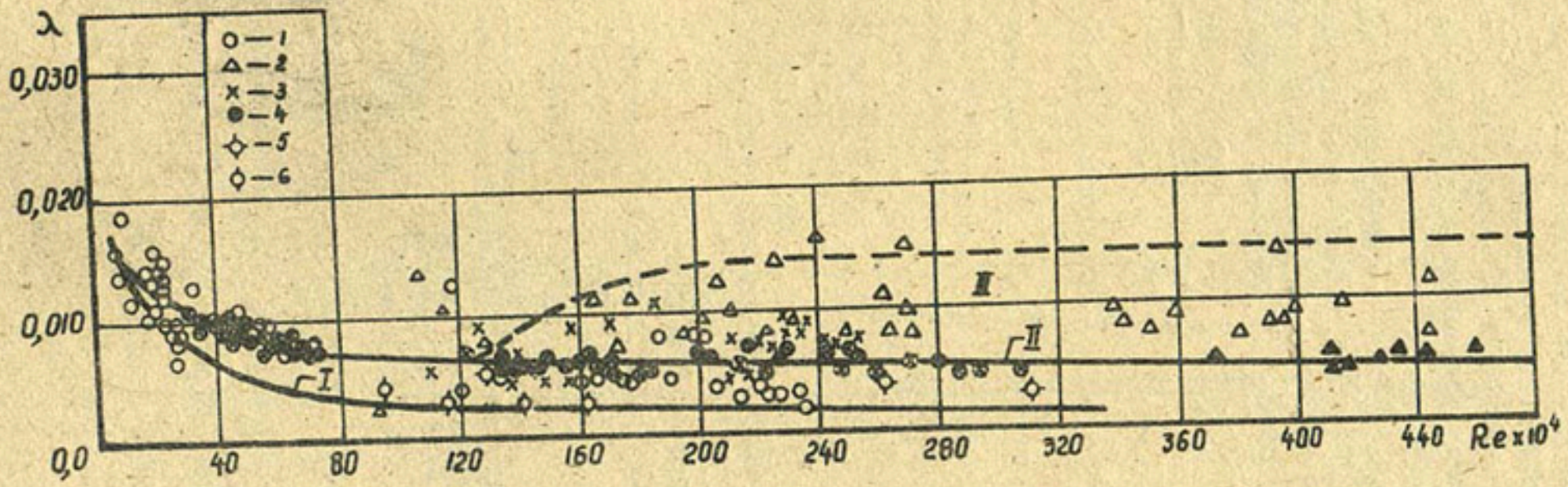


рис.3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления λ от числа Рейнольдса Re : I,2,3,4,5 – то же, что и на рис.I; 6 – спрямление канала им.Ленина (I978 г.). I – область гладкого сопротивления, II – область критического режима, III – область шероховатого сопротивления (размывающий режим).

Данные натурных исследований показывают, что гидравлические сопротивления зависят от нагрузки потока взвешенными наносами ($\rho\bar{w}$) и вертикальной составляющей скорости, принятой нами в масштабе динамической скорости (рис.4). С увеличением $\rho\bar{w}$ гидравлические сопротивления уменьшаются и изменяется распределение скоростей.

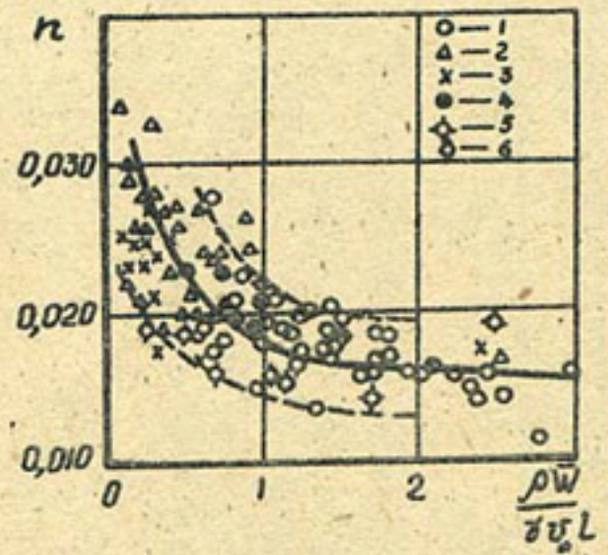


Рис.4. Зависимость $n=f\left(\frac{\rho\bar{w}}{\gamma v_i}\right)$
I,2,3,4,5,6 - то же, что и на рис.3.

Анализируя и обобщая многочисленные натурные данные о режиме каналов низовьев Амударьи, а также используя рис.4, получаем формулу для определения шероховатости русл в виде

$$n=\left(0{,}015K+\frac{0{,}006}{1+\varphi}\right)\cdot R-\frac{1}{12}, \quad (3)$$

где K - коэффициент гладкости: для канала, покрытого илистым слоем, K = I,0; для шероховатых русл каналов K = I,45; для чистого потока K = I,25;

$\varphi=\frac{\rho\bar{w}}{\gamma v_i}$ - коэффициент, учитывающий устойчивое состояние каналов;

R - гидравлический радиус.

Данные натурных измерений коэффициента шероховатости приведены в таблице.

Таблица

Канал	Кол-во измерений	Значения коэффициента шероховатости				Режим
		Маннинг	Павловский	Агроскин	по формуле (3)	
Кызкеткен (I952 г.)	I9	0,0I7	0,0I75	0,0I75	0,0I8	Критич.
Кегейли (I952 г.)	I3	0,0I87	0,0I94	0,0I9I	0,0I83	Критич.
Кызкеткен (I976-I977гг.)	7	0,0272	0,0278	0,028I	0,024	Размыв.
Кызкеткен (I952 г.)	5	0,0I43	0,0I49	0,0I44	0,0I64	Заилен.

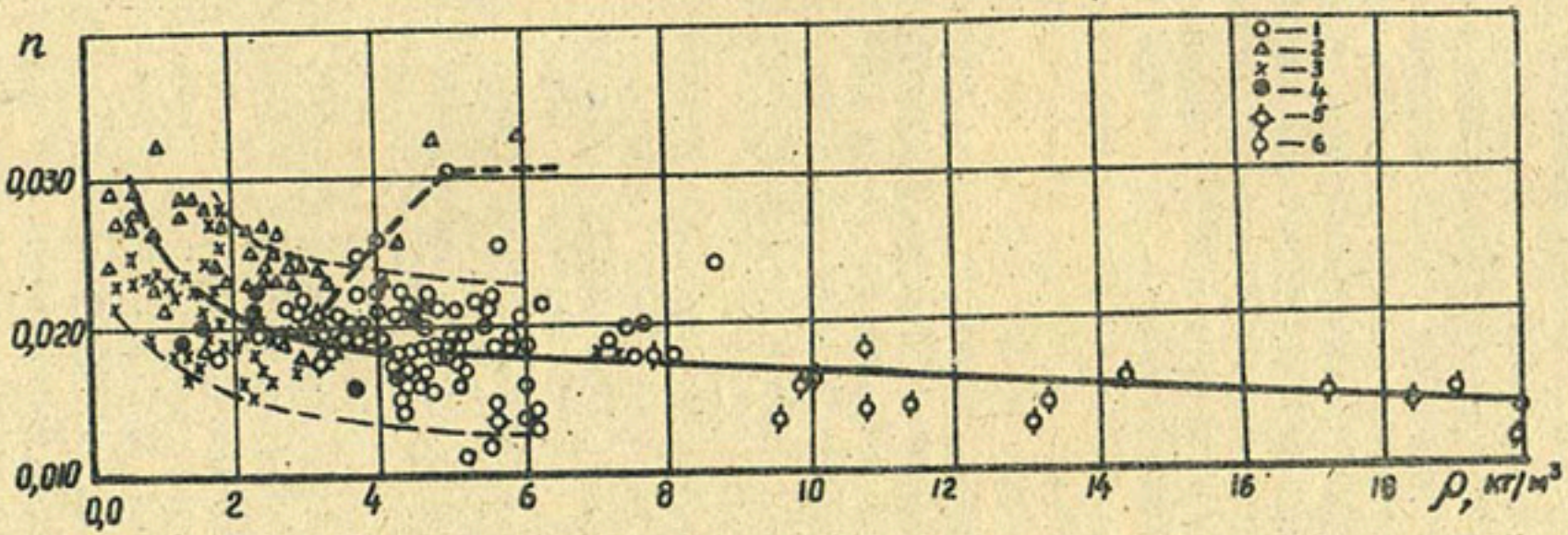


Рис.5. Зависимость коэффициента шероховатости русл от мутности потока: I,2,3,4,5 - то же, что и на рис.I; 6 - системы "Народная победа" р.Хуэнхе".

Из данных таблицы следует, что значения n во всех расчетных формулах близки друг к другу при критическом режиме, а при заиляющем режиме формула (3) дает завышенные и при размывающем режиме – заниженные результаты по сравнению с формулами Маннинга, Павловского и Агроскина.

Поскольку теоретическое решение затронутого нами вопроса в настоящее время представляется крайне затруднительным (из-за недостаточной изученности влияния различных действующих факторов), нами были предприняты попытки получить приближенные зависимости чисто эмпирическим путем. При этом наилучшие результаты дала приведенная на рис.5 зависимость коэффициента шероховатости "n" от мутности потока "ρ", которая нами рекомендуется для практического использования при проведении соответствующих расчетов.

Выводы

1. Каналы нижнеамударьинских оросительных систем в процессе их эксплуатации работают с переменным наносным режимом, обусловливаемым изменениями мутности и состава речных наносов в годовом и многолетнем разрезе, а также ходом руслового процесса в створах водозабора (включая и процессы в подводящем русле Тахиаташской плотины).

2. В результате переменного наносного режима в одни периоды эксплуатации каналов в них происходит отложение мелкопесчаных наносов, в другие – размыв этих отложений (до полного их смыва).

3. Отложения мелкопесчаных наносов в каналах выравнивают поверхность русла, уменьшая тем самым коэффициент шероховатости канала "n" в 1,5–2,0 раза, чему способствует также образование в придонной области грязевого слоя с большой вязкостью, движущегося по законам плотного (тяжелого) потока.

4. Размыв отложений (или русла канала), создавая неровности поверхности (русловые микроформы, вымоины и т.п.), может увеличить коэффициент шероховатости "n" до 1,5 раз против значений, соответствующих критическому режиму.

5. Для учета указанных изменений коэффициента шероховатости в практических расчетах при эксплуатации оросительных систем Каракалпакии рекомендуется использовать приведенный на рис.5 график $n = f(\rho)$, полученный на основе материалов натурных измерений, и для определения значения "n" – зависимость (3).

В. А. НИКОЛАЕНКО, канд. хим. наук
А. П. ОРЛОВА, канд. техн. наук
О. С. ДУНИН-БАРКОВСКАЯ
(САНИИРИ им. В. Д. Журина)

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ СЫРДАРЬИ И АМУДАРЬИ С УЧЕТОМ ПЕРЕБРОСКИ ЧАСТИ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК

В Среднеазиатском регионе в перспективе можно оросить и освоить до 25 млн. га земель. Однако при сохранении существующих темпов освоения новых поливных земель водные ресурсы рек Сырдарьи и Амударьи будут исчерпаны в ближайшей перспективе. Поэтому вопрос о водообеспеченности Среднеазиатского экономического региона – исключительно важный. Кардинальный путь его решения – переброска части стока сибирских рек в Среднюю Азию [1].

Следует указать и на такой немаловажный факт, как заметное изменение природного качества водных ресурсов Средней Азии. Это подтверждается работами, проведенными различными научно-исследовательскими институтами [4-7].

В 1978-1980 гг. отделом охраны водных ресурсов САНИИРИ проводились исследования по прогнозу качества вод Сырдарьи и Амударьи как без учета, так и с учетом переброски части стока сибирских рек.

Сибирская вода по Главному каналу переброски – Иртыш-Средняя Азия – будет подходить к низовьям рек Сырдарьи и Амударьи.

По прогнозу, минерализация сибирской воды при сбросе в Чардаринское водохранилище составит 500 мг/л, в самом водохранилище – 1,43 г/л, а после смешения с сибирской водой снизится до 1,23 г/л.

В нижнем бьефе Чардаринского водохранилища минерализация воды немного увеличится за счет испарения и составит 1,32 г/л.

Таблица I

Прогноз изменения среднемесячной минерализации воды Сырдарьинского канала и р. Сырдарьи с учетом переброски части стока сибирских рек (г/л)

Створ	IУ	У	УI	УП	УШ	IX	X	XI	XII	I	II	III
Сырдарьинский канал	0,60	0,50	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,50	0,52	-	0,62	0,65
Чардаринское водохранилище после смешения вод	I,22	I,20	I,20	I,20	I,24	I,24	I,24	I,20	I,20	I,38	I,20	I,22
Отток из Чардаринского водохранилища	I,32	I,30	I,28	I,28	I,34	I,34	I,30	I,27	I,30	I,48	I,30	I,3I
Сброс в Аральское море	I,44	I,44	I,50	I,54	I,60	I,60	I,60	I,60	I,60	I,62	I,53	I,46

Предполагается часть сырдарьинской воды подкачивать в Чирчик-Ахангаран-Келесский водохозяйственный район (ЧАКИР), использовать ее для орошения и нужд промкомбыта. В то же время р.Сырдарья будет принимать небольшие объемы воды из Арысь-Туркестанского водохозяйственного района (АрТур), а также - возвратные воды с низовьев и дельты реки. При этом минерализация возвратных вод с низовьев и дельты в среднем составит 2,00 г/л, а сбросов из АрТура в Сырдарью - 3,50 г/л. Согласно прогнозным расчетам, минерализация воды р.Сырдарьи при сбросе в Аральское море будет составлять I,54 г/л, т.е. благодаря смешению сырдарьинской воды с сибирской минерализация воды в нижнем створе реки уменьшится на I,I6 г/л.

Среднемесячная минерализация воды р.Сырдарьи после смешения ее с сибирской представлена в таблице I.

Как видно из таблицы, минерализация воды в Чардаринском водохранилище после смешения ее с сибирской будет изменяться в течение года от I,20 до I,38 мг/л, а при сбросе в Аральское море - от I,44 до I,62 мг/л.

Прогноз содержания главных ионов выполнен на основании сопоставления зависимостей ионного состава от прогнозной минерализации воды р.Сырдарьи. В табл.2 приведены результаты расчета прогноза содержания главных ионов и минерализации в различные периоды: летняя (август-сентябрь) и зимняя межень (ноябрь-январь), вегетационный (апрель-август) и невегетационный периоды (сентябрь-март).

Таблица 2

Прогноз содержания главных ионов и минерализации воды р.Сырдарьи с учетом переброски части стока сибирских рек (г/л)

Период	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	Zu
	После смешения сырдарьинской и сибирской воды						
Летняя межень	0,I3	0,09	0,I6	0,20	0,47	0,I7	I,22
Зимняя межень	0,I3	0,09	0,I7	0,20	0,48	0,I7	I,24

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	HCO_3^{-}	SO_4^{2-}	Cl^{-}	Σu
Вегетационный	0,I2	0,09	0,I6	0,20	0,46	0,I7	I,20
Невегетационный	0,I3	0,09	0,I6	0,20	0,48	0,I7	I,24
Сброс в Аральское море							
Летняя межень	0,I7	0,I3	0,20	0,2I	0,66	0,20	I,57
Зимняя межень	0,I7	0,I4	0,20	0,2I	0,67	0,2I	I,60
Вегетационный	0,I6	0,I3	0,I9	0,20	0,62	0,20	I,50
Невегетационный	0,20	0,I5	0,25	0,23	0,73	0,24	I,80

Превалирующими ионами, как показывают данные табл.2, являются: из анионов - сульфаты, а из катионов - сумма натрия и калия.

По классификации О.А.Алекина /.2/, вода р.Сырдарьи после смешения ее с сибирской не изменит класс, группу и тип, т.е. будет относиться к сульфатному классу, группе натрия, второму типу.

Нами составлен прогноз наличия неконсервативных веществ в воде р. Сырдарьи после смешения ее с сибирской. Получены результаты содержания этих веществ при температуре воды от I0 до I5°С.

Следует отметить, что концентрация биогенных элементов, органических веществ и растворенных газов уменьшится и не будет превышать предельно допустимую концентрацию для различных видов водопользования /3/.

По Главному каналу переброски сибирская вода будет подходить к р.Амударье и после смешения с амударьинской минерализация ее составит 500 мг/л.

Как видно из таблицы 3, минерализация амударьинской воды в Тюямуюнском водохранилище после смешения с сибирской будет находиться в пределах 0,9-I,5 г/л, а при сбросе

Таблица 3

Прогноз изменения среднемесячной минерализации вод в низовьях и дельте р. Амударьи (с учетом переброски части стока сибирских рек), г/л

Створ	IУ	У	УI	УП	УШ	IX	X	XI	XII	I	II	III	Средняя за год
Тюямуюнское водохранилище	I,3	I,4	I,2	I,I	I,I	I,5	I,2	I,4	I,0	I,5	0,9	I,4	I,3
Попуск в н/б Тюямуюнского водохранилища	I,4	I,5	I,3	I,2	I,2	I,7	I,3	I,5	I,I	I,7	I,0	I,5	I,4
Приток к ств. Тахиаташ	0,7	0,8	0,6	0,5	0,5	0,9	0,6	0,8	0,6	0,9	0,5	0,8	0,7
Сброс в Аральское море	0,7	0,8	0,6	0,5	0,5	0,9	0,6	0,8	0,6	0,9	0,5	0,8	0,7

в Аральское море – 0,5–0,9 г/л.

Среднегодовое содержание главных ионов после смешения с сибирской водой распределится следующим образом (в г/л):

в створе Тюямуюн

SO_4^{2-} – 0,40	Cl – 0,33
HCO_3 – 0,18	Ca^{2+} – 0,13
Mg^{2+} – 0,03	$Na^{+}+K^{+}$ – 0,23

в створе Тахиаташ

SO_4^{2-} – 0,20	Cl – 0,15
HCO_3^{-} – 0,12	Ca^{2+} – 0,07
Mg^{2+} – 0,03	$Na^{+}+K^{+}$ – 0,10

Из приведенных данных следует, что после смешения с сибирской водой в р. Амударье так же, как и в Сырдарье, превалирующими ионами будут SO_4^{2-} и $Na^{+}+K^{+}$. Что касается кислородного режима, содержания биогенных и органических веществ, то они в низовьях и дельте Амударьи не превысят предельно допустимых норм.

В заключение следует отметить, что переброска части стока сибирских рек должна привести к улучшению качества вод в нижнем течении Сырдарьи и Амударьи.

Литература

1. К.И. Лапкин. Социально-экономические проблемы переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан. Ташкент, "Фан", 1979.
2. О.А. Алекин. Основы гидрохимии. Л., Гидрометеоиздат, 1970.
3. Общие требования к составу и свойствам воды водоемов, используемых в рыбохозяйственных целях, и перечень предельно допустимых концентраций вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов (№ 30-I-П, 9.07.1971 и 30-I-П, 17.12.1976).

4. А.П. О р л о в а. Прогноз качества воды р. Сырдарьи. Сб.научных трудов САНИИРИ, вып. I38 "Обводнение, сельскохозяйственное водоснабжение", Ташкент, I973.

5. Ф.Э. Р у б и н о в а, М.И.Г е т к е р, Л.М. К у р о п а т к а. Сток возвратных вод в бассейне р. Сырдарьи и его влияние на минерализацию речной воды в современных условиях и в перспективе. Тр. САРНИГМИ, вып. 25 (I06), Л., I975.

6. И.Н. С т е п а н о в, Э.И. Ч е м б а р и с о в. Влияние орошения на минерализацию речных вод. М., Изд-во "Наука", I978.

7. Э.М. Ч е м б а р и с о в. О необходимости переброски части стока сибирских рек для улучшения качества речных вод бассейна Аральского моря. В кн.: "Материалы Всесоюзного совещания по мелиорации почв Средней Азии, Казахстана и Западной Сибири в связи с переброской части стока сибирских рек в южные районы страны". Пущино-на-Оке. Изд-во АН СССР, I973.

А.М. МУХАМЕДОВ, докт.техн.наук
Х.Х. ИШАНОВ
Т.Ж. ЖУРАЕВ, канд.техн.наук
(САНИИРИ им. В.Д.Журина)

К МЕТОДИКЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КРУПНЫХ КАНАЛОВ

Основным вопросом проектирования крупных каналов в несвязных грунтах является обеспечение устойчивости русла в условиях подвижного дна. Для этого необходимо допустимые значения относительной скорости U/U_0 и соответствующую им форму поперечного сечения русла ($B/H_{ф}$), которые обеспечивали бы устойчивость русла и потока при их динамическом равновесии.

Допустимое значение U/U_0 зависит от грунтов, слагающих дно и откосы русла, от количества и состава транспортируемых взвешенных и донных наносов. В качестве исходных данных для проектирования крупных каналов должны быть известны расход воды и грунтовая характеристика русла.

Если канал будет транспортировать донные и взвешенные наносы, попадаемые из источника питания, то в число исходных данных должно входить их количество и состав. При указанных исходных данных традиционный метод допустимых скоростей потока / I /, методы подобия [2] и устойчивости откосов [3, 4], гидроморфологический метод [5] и другие для проектирования крупных каналов с $U>U_0$ неприемлемы, так как система уравнений, используемая в них, остается незамкнутой.

Разработанные в последнее время методы [6, 7] позволяют при указанных исходных данных рассчитать крупные каналы. Однако метод [6] при выборе параметра формы русла требует учета крупности наносов и расхода воды, в методе [7] недостаточно обоснованно принимается параметр Шильдса как параметр продольной устойчивости в условиях $U>U_0$.

Таким образом, методика расчета каналов еще далека от своего совершенствования и требует дальнейших исследований. Этот вопрос приобретает большую актуальность в связи с проектированием и строительством каналов межбассейновых переброс стока. Для расчета каналов нами использованы формулы, полученные в результате анализа и обработки лабораторных и натурных данных, а также результаты крупномасштабных модельных исследований. Среднюю скорость течения в канале с устойчивым руслом можно вычислить по формуле [8].

$$U = 0{,}55\left(\frac{Q}{\sqrt{g}\mathcal{D}^{2,5}i}\right)^{0{,}275}\sqrt{g\mathcal{D}i}\,, \qquad (I)$$

где

U – средняя скорость потока, м/с;
Q – расход воды, м^3/с;
i – продольный уклон;
$\mathcal{D}$ – грунтовая характеристика, в случае несвязных грунтов $\mathcal{D} = d_{ср}$, м;
g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Параметр формы русла $B/H_{ср}$ можно рассчитать по обобщенной формуле, установленной нами для диапазона $0{,}03 \leq d_{ср} \leq 0{,}3$ мм и Q до 2500 м^3/с на основании данных /9/:

$$\frac{B}{H_{ср}} = A_0\left[\frac{Q}{\sqrt{g}d_{ср}^{2,5}i}\left(\frac{i}{\rho_1}\right)^{5/2}\right]^{X_0}, \qquad (2)$$

где

A_0 и X_0 – параметры, зависящие от числа Архимеда;

здесь $\rho_1 = (\rho_т - \rho)/\rho$;

$\rho_т, \rho$ – соответственно плотность грунта и воды, тс^2/м^4.

Установлено, что

$$A_0 = \frac{50{,}8}{Ar^{0,405}d}, \qquad (3)$$

$$X_0 = 0{,}126\sqrt[3]{Ard} - 0{,}246\,, \qquad (4)$$

где

Ard – число Архимеда

$$Ard = \frac{g d_{\varphi}^{3}}{\nu^{2}} \rho_{1}; \qquad (5)$$

ν – кинематический коэффициент вязкости, $м^2/с$.

В условиях $U > U_0$ любое первоначально заданное русло будет деформироваться. Степень деформации и время для полной стабилизации русла, как показывают результаты крупномасштабных модельных исследований, зависят от первоначально заданной формы русла, а также от гидравлических характеристик потока. В результате длительного взаимодействия потока с руслом канал приобретает устойчивую корытообразную форму, соответствующую скоростному полю потока. При этом заложение откоса грунта у уреза равно естественному значению заложения откоса под водой (т.е. $m = m_0$).

В общем виде эту форму можно аппроксимировать уравнением

$$\frac{y}{H_м} = \left(\frac{2x}{B}\right)^{\alpha}, \qquad (6)$$

где

y и x – координаты поперечного сечения русла, при расположении начала координат на дне канала, м;

$H_м$ – максимальная глубина потока, м;

B – ширина по урезу воды, м;

α – переменный показатель, зависящий от гидравлических и грунтовых характеристик русла.

Натурные данные по Каракумскому каналу [5] показывают, что показатель степени α изменяется в пределах I,65–5 и, по-видимому, зависит от гидравлических и грунтовых характеристик потока и русла. Несмотря на этот факт при проектировании крупных каналов /I–3,

5-7/ форма поперечного сечения подбирается недостаточно обоснованно.

Установлено, что

$$\alpha = \frac{1}{2m_0}\beta_{cp} - 1, \qquad (7)$$

где

$\beta_{cp} = B/H_{cp}$ определяется по (2);

m_0 – коэффициент естественного заложения откоса грунта под водой.

При отсутствии данных о m_0, этот коэффициент для несвязных грунтов может быть определен по формуле

$$m_0 = \frac{3{,}387}{A_{50}^{0{,}1}}. \qquad (8)$$

Для замыкания системы, состоящей из (I), (2) и (6), необходимы дополнительные уравнения, в качестве которых могут быть использованы так называемые условия продольной и поперечной устойчивости потока и русла.

В условиях пропуска чистой воды или с небольшим содержанием взвешенных (коллоидных) наносов условие продольной устойчивости можно выразить следующим образом:

$$\frac{U}{U_0} \leq \left(\frac{U}{U_0}\right)_p, \qquad (9)$$

где

$\frac{U}{U_0}$ и $\left(\frac{U}{U_0}\right)_p$ – фактическая и допустимая относительные скорости течения в канале.

На основе крупномасштабных модельных исследований установлено, что для каналов, проходящих в барханных песках, $\left(\frac{U}{U_0}\right)_p \leq$ I,2÷I,3. В случае закрепленных берегов из суглинистых и супесчаных грунтов, по натурным данным З.Н.Нуритдинова и др. (САНИИРИ), $\left(\frac{U}{U_0}\right)_p \leq$ I,7–I,8.

Неразмывающую скорость потока в канале, проходящем через средний и мелкий песок, можно вычислить по формуле

$$U_0 = 1{,}41\left(\frac{H}{d_{cp}}\right)^{0{,}16}\sqrt{g\rho_1 d_{cp}}. \qquad (10)$$

Относительные неразмывающие скорости каналов, пропускающих взвешенные и донные наносы, изучены недостаточно. В отечественной практике определение относительной скорости сводится к нахождению транспортирующей способности потока, так как она достаточно хорошо изучена [II]. Поэтому условием продольный устойчивости в случае транспорта взвешенных и донных наносов является

$$\rho\bar{W} = (\rho\bar{W})_р , \qquad (II)$$

где

$\rho\bar{W}$ и $(\rho\bar{W})_р$ – фактическая и допустимая транспортирующие способности, т/м^3.

Поперечная устойчивость потока и русла определяется параметром формы русла $B/H_{ср}$ и заложением откоса грунта на урезе m. В устойчивом русле принятое значение $B/H_{ср}$ должно равняться оптимальному значению $(B/H_{ср})_р$, определяемому по зависимости (2). Крупномасштабными модельными исследованиями установлено, что для каналов в мелких и средних песках при $(U/U_о)_р = I,2 \div I,3$ $(B/H_{ср})_р = I8–25$.

Заложение откоса грунта на урезе должно приниматься не менее значения естественного заложения грунта под водой $m_о$, т.е. $m \geq m_о$.

Таким образом, при проектировании каналов в земляных руслах для пропуска чистой воды или с небольшим содержанием коллоидных наносов условиями устойчивости являются

$$\frac{U}{U_о} = \left(\frac{U}{U_о}\right)_р ; \quad \frac{B}{H_{ср}} = \left(\frac{B}{H_{ср}}\right)_р ; \; m \geq m_о , \qquad (I2)$$

а при транспорте взвешенных и донных наносов

$$\rho\bar{W} = (\rho\bar{W})_р ; \; \frac{B}{H_{ср}} = \left(\frac{B}{H_{ср}}\right)_р ; \; m \geq m_о . \qquad (I3)$$

Порядок гидравлического расчета каналов для пропуска чистой воды при наличии в качестве исходных данных Q и $d_{ср}$ следующий.

I. Задаемся значением продольного уклона i и определяем U и $B/H_{ср}$ по формулам (I) и (2), а также показатель степени α по (7).

2. Вычисляем среднюю и максимальную глубину потока:

$$= \sqrt{\frac{Q}{U\beta_{ср}}}, \qquad (I4)$$

$$H_м = \frac{\alpha+1}{\alpha} H_{кр}, \qquad (I5)$$

определяем ширину по урезу воды:

$$B = \beta_{ср} H_{ср}. \qquad (I6)$$

3. Вычисляем неразмывающую скорость по формуле (I0) и проверяем условие (I2).

Если $(U/U_0)_1 < (U/U_0)_р$, задаемся новым значением $i_2 > i_1$ и повторяем расчет. Если $(U/U_0)_2 < (U/U_0)_р$, то задаемся $i_3 < i_2$.

Расчет повторим до выполнения условий (I2). В случае пропуска воды с взвешенными и донными наносами при наличии исходных данных Q, $d_{ср}$ и $(\rho\bar{W})_р$ порядок расчета до пункта (2) такой же, что и выше. Затем надо вычислить транспортирующую способность потока $\rho\bar{W}$ по существующим рекомендациям [II] и проверить условия (I3). При выполнении условий (I3) расчет считается оконченным.

Выполненные нами расчеты на ЭВМ типа БЭСМ-4М позволили установить формулу для случая пропуска чистой воды

$$i = 273\cdot10^{-5} \frac{(U/U_0)^{2,768}}{Q^{0.535}} \cdot Ar d^{\frac{0.425}{(U/U_0)^{0.18}}}. \qquad (I7)$$

Это формула позволяет вести расчет без подбора.

Результаты гидравлических расчетов каналов, проходящих через песчаные грунты с $d_{ср}$ = 0,25 мм, при $(v/v_0)_р$ = 1,2, приведены в следующей таблице.

Таблица

Q, м³/с	$i \cdot 10^6$	v, м/с	$\beta_{ср}$	B, м	$H_{ср}$, м	$H_м$, м	α
100	33,2	0,50	19,5	62,2	3,19	4,43	2,588
500	14,5	0,57	18,4	126,2	6,9	9,79	2,387
600	12,8	0,58	18,3	137,2	7,5	10,67	2,366
1000	9,6	0,61	17,7	171	9,68	13,98	2,249

Как показывают результаты расчета, в нашем методе нигде не фигурирует коэффициент шероховатости, который трудно поддается нормированию в условиях грядовой или иной формы движения наносов в каналах с земляным руслом, подвергающимся деформациям под воздействием потока.

По предлагаемой методике можно с достаточной уверенностью произвести гидравлический расчет каналов в зависимости от грунтовых характеристик жидкого и твердого стока.

Литература

1. Техническое Указание по проектированию каналов оросительных систем. М., изд.МСХ СССР, 1955.
2. Гришанин К.В. Устойчивость русл рек и каналов. Л., "Гидрометеоиздат", 1974.
3. Иваненко Ю.Г. К вопросу об устойчивости сечения аллювиального русла. Ташкент, „Изв. АН УзССР", серия технических наук, № 6, 1963.
4. Кузьминов Ю.М. Мелиоративные каналы в легкоразмываемых грунтах. М., "Колос", 1977.

5. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляных руслах. М., "Колос", 1979.
6. Михалев М.А. Особенности гидравлического расчета крупных каналов в несвязных грунтах с учетом транспорта наносов. Л., Тр. ЛПИ, № 351, 1976.
7. Скрыльников В.А., Губина Т.Ю. К вопросу расчета устойчивых сечений крупных каналов в мелкопесчаных грунтах. Ташкент, "Изв.АН УзССР", серия технических наук, № 1, 1980.
8. Аидов Х.А. Гидроморфологические зависимости ирригационных каналов в бассейне р. Амударьи. Автореферат канд.дисс., Ашхабад.
9. Мухамедов А.М., Ишанов Х.Х., Жураев Т.Ж. О допустимых скоростях потока в крупных земляных каналах. "Гидротехника и мелиорация", № 7, 1981.
10. Мухамедов А.М., Ишанов Х.Х., Жураев Т.Ж. Результаты экспериментальных исследований неразмывающих скоростей течения для натурного и керамзитового песка. "Доклады ВАСХНИЛ", № 4, 1981.
11. Абальянц С.Х. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. Л., "Гидрометеоиздат", 1981.

Р Е Ф Е Р А Т Ы

к сборнику научных трудов, вып. 162 (Проблема переброски части стока сибирских рек в Среднюю Азию и Казахстан)

УДК 626.8:532.5.001.25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕРАЗМЫВАЮЩИХ СКОРОСТЕЙ В КЫЗЫЛКУМСКОМ КАНАЛЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ РЕКОМЕНДАЦИЯМИ

А.А.Кадыров, В.А.Скрыльников, З.Н.Нуритдинов

Сборник научных трудов, вып.162, Ташкент, САНИИРИ, 1981.

Статья посвящена проблеме оценки неразмывающих скоростей в крупных каналах с руслами в мелкопесчаных грунтах. По данным натурных исследований в Кызылкумском канале определена неразмывающая скорость при глубине 1 м и полученные результаты сравниваются с существующими рекомендациями..

Иллюстр. 3, библ. 4.

УДК 626.01

ФОРМА РУСЛА ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

С.Х.Абальянц

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

В статье приводится расчет формы поперечного сечения русла предельного равновесия, предложенного в несвязных грунтах - песках и супесях - основанный на рассмотрении параметров реальных потоков в натуре. В результате расчета получено, что русло должно быть несколько более широким, чем по известной косинусоиде Форхгеймера-Лейна.

Иллюстр. 2, табл. 2, библ. 11.

УДК 626.624.131.6

УЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ (ПРОЧНОСТИ) МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ КАНАЛОВ

А.А.Кадыров, В.И.Буланкин

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

Дается феноменологическое обоснование структуры формулы для учета сопротивления сдвигу (прочности)

мелкозернистых несвязанных и малосвязанных грунтов при гидравлическом расчете каналов. С учетом рекомендаций Е.Лейна и Ц.Е.Мирцхулавы, а также анализа результатов массовых натурных измерений на устойчивых участках каналов дается оценка "веса" каждой из трех составляющих сопротивления в зависимости от средней крупности грунта и прогнозируемых условий работы каналов.

Делается вывод о том, что сопротивление сдвигу (прочность) грунта русл при благоприятных условиях эксплуатации возрастает со временем, стремясь к некоторому пределу, величина которого существенно зависит от условий работы (наносного режима) каналов.

Иллюстр. 4, табл. 2, библ. 14.

УДК 627.8

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РУСЛ КРУПНЫХ КАНАЛОВ В МЕЛКОПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

В.А.Скрыльников

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

В статье приводится моделирование плановой устойчивости русл крупных каналов с использованием натурного песка и его заменителей с малым удельным весом. Отмечается, что модельное сечение геометрически подобно натурному и выдерживается натурная плановая устойчивость. Предложенная методика применима при исследовании канала переброски и других крупных каналов.

Иллюстр. 1, табл. 3, библ. 9.

УДК 626.8:002.5

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СТРОИТЕЛЬСТВА КРУПНЫХ КАНАЛОВ ШАГАЮЩИМИ ЭКСКАВАТОРАМИ

У.Ю.Пулатов, Р.М.Давляканов

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

В статье даются результаты проработки вариантов строительства крупных каналов мощными шагающими экскаваторами.

По результатам исследований рекомендован наиболее экономически выгодный комплекс машин.

Иллюстр. 2, табл. I.

УДК 551.582.212

ИССЛЕДОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗМЫВАЕМЫХ МОДЕЛЯХ С НЕИСКАЖЕННЫМИ МАСШТАБАМИ

М.Р.Карапетян

Сборник научных трудов, вып. I62, Ташкент, САНИИРИ, I98I

В статье рассматривается метод расчета моделей с использованием критерия подвижности $\frac{v}{v_0} = idem$, приводятся масштабные множители.

С помощью предлагаемой методики моделирования на размываемых моделях, выполненных как из песка, так и из заменителей, можно решать вопросы подбора размеров устойчивых русл каналов, исследовать допустимые деформации в искусственных линейных сооружениях.

УДК 532.536

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРА ФОРМЫ УСТОЙЧИВЫХ СЕЧЕНИЙ КАНАЛОВ

А.М.Мухамедов, Х.Х.Ишанов, Т.Ж.Кураев

Сборник научных трудов, вып. I62, Ташкент, САНИИРИ, I98I

Приводятся основные результаты крупномасштабных модельных исследований деформации русла каналов в несвязных грунтах. Установлено существенное влияние формы поперечного сечения русла и относительной скорости потока на устойчивость канала. На основании результатов исследований установлены диапазоны параметра формы русла и относительной скорости потока, обеспечивающие устойчивость канала в несвязных грунтах.

Иллюстр. I, библ. 4.

УДК 626.394.001.18:627.4

ПРОГНОЗ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК СЫРДАРЬИ И АМУДАРЬИ В СВЯЗИ С ПЕРЕБРОСКОЙ ЧАСТИ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК

К.В.Громыко

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

Прогноз гидробиологического режима рек Сырдарьи и Амударьи проводился методом аналогии и оценки адаптационных возможностей водных организмов.

Экологогеографический анализ гидробиологических режимов водоемов и водотоков Средней Азии, Казахстана и Западной Сибири, вовлеченных в сферу переброски, показал, что они формируются преимущественно за счет организмов с широким ареалом и поэтому имеют много общих черт. В связи с этим переброска части стока сибирских рек не вызовет существенного изменения качественного состава фито- и зоопланктона рек Средней Азии, но в то же время зообентос этих рек может пополниться новыми формами моллюсков. С другой стороны, переброска части стока сибирских рек будет способствовать улучшению качества воды рек Средней Азии, снижению степени их эвтрофности и уменьшению индекса сапробности.

УДК 532.517

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ СХЕМЫ ВОДОЗАБОРА ИЗ р. ОБИ В ГЛАВНЫЙ КАНАЛ ПЕРЕБРОСКИ

Р.Р.Абдураупов

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

При разработке схемы водозабора из р. Оби в ГКП был изучен и обобщен опыт проектирования и эксплуатации ряда бесплотинных водозаборов. Проанализированы природные условия формирования русл рек Иртыша и Оби, их водозабора.

В результате выполненных проработок и модельных исследований выбрана схема бесплотинного водозабора из р. Оби по типу ковша с низовым входом в устье Иртыша (одно-

головный), в других створах (многоголовый). При этом в качестве отводящего канала использовано русло нижнего Иртыша. В качестве другого варианта предложена схема водозабора (многоголовый) из р. Оби на 10 км ниже этого устья.

Иллюстр. 1.

УДК 627.42:592.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА НАНОСОВ р.АМУДАРЬИ НА РЕЖИМ НАНОСОВ КАРАКУМСКОГО КАНАЛА ПРИ БЕСПЛОТИННОМ ВОДОЗАБОРЕ

М.Р.Карапетян, А.Ю.Горский

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

В статье приводятся результаты натурных исследований, выполненных на р. Амударье и Каракумском канале. Приводится состав взвешенных наносов реки и канала, процентное содержание донных наносов, рассматривается работа отстойников и влияние режима эксплуатации водозаборного сооружения и отстойника на режим движения взвешенных и донных наносов.

Табл. 2.

УДК 621.317.763

ГАСИТЕЛИ КРУТЫХ ВОЛН ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЛЯ КРУПНЫХ МАШИННЫХ КАНАЛОВ

Х.И.Заиров, П.П.Листровой

Сборник научных трудов, вып. 162, Ташкент, САНИИРИ, 1981

Формулируются задачи гашения крутых волн перемещения, образующихся в машинных каналах при пусках и остановках насосных агрегатов. Описываются конструкции специальных волногасителей. На основании результатов модельных исследований определяются основные требования, которым должна отвечать конструкция гасителей для условий крупных машинных каналов.

Иллюстр. 4, библ. 9.

УДК 626.8

О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ В КАНАЛАХ НИЖНЕАМУДАРЬИНСКИХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

К.И.Байманов

Сборник научных трудов, вып. I62, Ташкент, САНИИРИ, I98I

Приводятся результаты натурных исследований гидравлического режима работы крупных каналов низовьев Амударьи, а также изменения коэффициента шероховатости в зависимости от характера русловых деформаций русла, определяемого изменения количества наносов, поступающих в голову канала из реки. Приводится ряд эмпирических зависимостей ($n=f(R)$; $n=f(Re)$, $n=f(P)$, построенных по данным многочисленных измерений на каналах нижнеамударьинских оросительных систем, которые можно использовать для практического расчета. Дана формула для определения шероховатости русл с учетом мутности потока.

Иллюстр. 5, табл. I.

УДК 626.394.00I.I8

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ СЫРДАРЬИ И АМУДАРЬИ С УЧЕТОМ ПЕРЕБРОСКИ ЧАСТИ СТОКА СИБИРСКИХ РЕК

В.А.Николаенко, А.П.Орлова, О.С.Дунин-Барковская

Сборник научных трудов, вып. I62, Ташкент, САНИИРИ, I98I

Даются результаты исследований изменения качественного состава воды Сырдарьи и Амударьи в условиях переброски части стока сибирских рек.

Табл. 3.

УДК 532.536

К МЕТОДИКЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КРУПНЫХ КАНАЛОВ

А.М.Мухамедов, Х.Х.Ишанов, Т.Ж.Жураев

Сборник научных трудов, вып. I62, Ташкент, САНИИРИ, I98I

Рассматривается вопрос о гидравлическом расчете земляных каналов в условиях транспорта донных и взвешенных наносов.

На основании проведенных комплексных исследований разработана новая методика гидравлического расчета крупных каналов. Этот метод в отличие от существующих методов позволяет проектировать каналы при наличии наименьших чисел исходных данных (расход жидкого и твердого стока и грунт) без коэффициента шероховатости. Приводятся конкретные рекомендации по гидравлическим элементам земляных каналов.

Табл. I, библ. II.

Содержание

стр.

1. Кадыров А.А., Скрыльников В.А., Нуритдинов З.Н. Определение неразмывающих скоростей в Кызылкумском канале и сопоставление полученных результатов с существующими рекомендациями 3
2. Абальянц С.Х. Форма русла предельного равновесия 12
3. Кадыров А.А., Буланкин В.И. Учет сопротивления сдвигу (прочности) мелкозернистых грунтов при гидравлическом расчете каналов.. 22
4. Скрыльников В.А. Методика моделирования плановой устойчивости русл крупных каналов в мелкопесчаных грунтах 40
5. Пулатов У.Ю., Давлянканов Р.М. Разработка технологических процессов строительства крупных каналов шагающими экскаваторами 55
6. Карапетян М.Р. Исследование русловых процессов в размываемых моделях с неискаженными масштабами 61
7. Мухамедов А.М., Ишанов Х.Х., Жураев Т.Ж. Некоторые результаты модельных исследований параметра формы устойчивых сечений каналов 68
8. Громыко К.В. Прогноз гидробиологического режима рек Сырдарьи и Амударьи в связи с переброской части стока сибирских рек.... 72
9. Абдураупов Р.Р. Результаты исследований по выбору схемы водозабора из р. Оби в Главный канал переброски 78
10. Карапетян М.Р., Горский А.Ю. Исследование влияния режима наносов р. Амударьи на режим наносов Каракумского канала при бесплотинном водозаборе . . . 83

стр.

II. Заиров Х.И., Листровой П.П. Гасители крутых волн перемещения для крупных машинных каналов 89
I2. Байманов К.И. О гидравлических сопротивлениях в каналах нижнеамударьинских оросительных систем I0I
I3. Николаенко В.А., Орлова А.П., Дунин-Барковская О.С. Прогноз качества воды Сырдарьи и Амударьи с учетом переброски сибирских рек . . . III
I4. Мухамедов А.М., Ишанов Х.Х., Жураев Т.Х. К методике гидравлического расчета крупных каналов II8
I5. Рефераты..... I26