

УДК 556(073); 626/627 (575.2) (04)

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА
НА Р. КУГАРТ ПРИ ТРЕУГОЛЬНОМ ГИДРОГРАФЕ ПАВОДКА**

Н.П. Лавров – докт.техн. наук, профессор,

В.А. Биленко – канд.техн.наук, доцент,

И.П. Клепачев – аспирант

In the article the technique of modeling of silting on the river Kugart is described.

При проектировании гидроэнергетических и мелиоративных систем и систем защиты от наводнений необходима разработка рекомендаций по стабилизации русловых процессов, регулированию русл и берегоукрепительным работам. Теоретическое описание русловых процессов связано с решением дифференциальных уравнений [1], которые в явном виде до сих пор не имеют решения. Поэтому нами предпринята попытка моделирования руслового процесса на р. Кугарт, в пойме которой периодически наблюдаются наводнения.

Для упрощения процесса моделирования нами в качестве расчетного гидрографа принят искусственный паводок в виде треугольного гидрографа с максимальным расходом 100 м³/с в течение 144 ч. (рис. 1).

Методика моделирования русловых процессов подробно изложена нами в [2]. Кратко можно отметить ее следующие положения:

1. Гидравлические элементы потока моделируем по критерию Фруда.

2. Материал, применяемый при моделировании наносов, состоит из местных песков, плотность которых ρ_m идентична плотности наносов в натуре ρ_n , т.е. $\rho_m = \rho_n$.

3. Мутность моделируемого потока принимается равной мутности природы, так как

$$\lambda_p = \frac{M_n}{W_n} \cdot \frac{M_m}{W_m} = \frac{M_n}{M_m} \cdot \frac{W_m}{W_n} = \frac{\rho_n \cdot W_n}{\rho_m \cdot W_m} \cdot \frac{W_m}{W_n} = 1. \quad (1)$$

4. Наибольшая гидравлическая крупность наносов w_m , которые могут транспортироваться на модели во взвешенном состоянии, определяется по формуле [3]:

$$w_m = 0,3v_{*n} \frac{\lambda_l^{0,5}}{\lambda_h}, \quad (2)$$

где v_{*n} – динамическая скорость потока натурального объекта, λ_l и λ_h – масштабные коэффициенты соответственно длины и глубины.

5. За зависимость, характеризующую предельную транспортирующую способность потока, принята формула А.Г. Хачатряна [1, 4], которая дает удовлетворительные результаты. Она приведена нами в работе [2] к следующему виду:

$$\rho_T = k \frac{V^{1,8}}{H^{0,4} w_m^{0,25}}, \quad (3)$$

где k – коэффициент на основании [4] принимается равным 1; V и H – средняя скорость и глубина потока; w_m – минимальная гидравлическая крупность наносов.

Исходя из принятых положений для канализованного участка русла р. Кугарт со следующими параметрами: ширина по дну $b=35$ м, коэффициент заложения откосов $m=1,5$, уклон русла $i=0,0065$, коэффициент шероховатости принят, по рекомендациям [4], равным $n=0,016$. По формуле Шези [5] при расходе воды $Q=100$ м³/с нами определены гидравлические

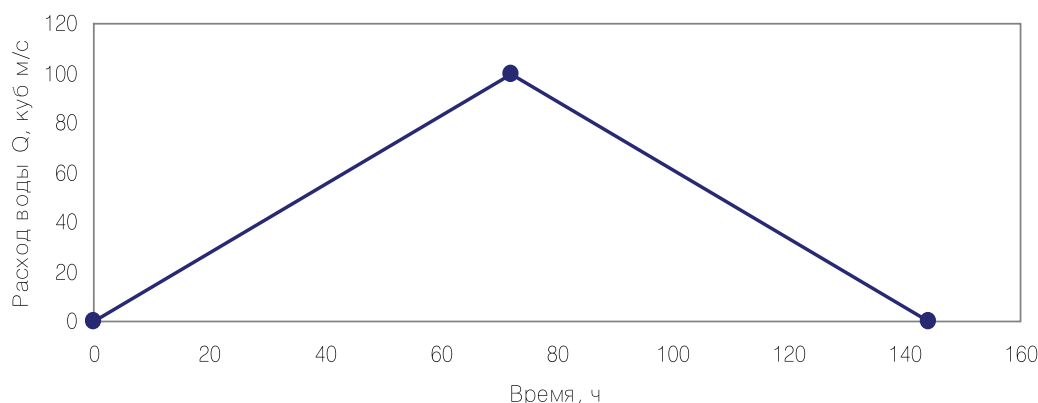


Рис. 1. Гидрограф искусственного паводка.

Таблица 1

Масштабные коэффициенты при моделировании русловых процессов по Фрудру

Величина	Масштабные коэффициенты	Масштабные множители
Длина – l	λl	200
Глубина – h	λh	50
Ширина – B	λB	50
Уклон – i	λi	0,255
Скорость потока – V	λV	3,54
Расход воды – Q	λQ	8839
Время – t	λt	56,57
Мутность – ρ	$\lambda \rho$	1
Гидравлическая крупность – ω	$\lambda \omega$	3,54

характеристики потока на рассматриваемом участке: наполнение в канализованном русле реки $H=1,15$ м, скорость потока $V=2,43$ м/с.

Тогда наибольшая гидравлическая крупность наносов при температуре воды $t=10^\circ\text{C}$ равна $w_m = 0,21$ м/с, что соответствует диаметру частицы $d = 0,25$ мм [5], а предельная транспортирующая способность потока равна

$$\rho_T = k \frac{V^{1,8}}{H^{0,4} w_m^{0,25}} = 1 \cdot \frac{2,43^{1,8}}{1,15^{0,4} \cdot 0,21^{0,25}} = 6,6 (\text{кг} / \text{м}^3)$$

Величины масштабных коэффициентов длины λ_l , глубины λ_h , уклона λ_i , скорости λ_v , расхода λ_Q , времени λ_t , мутности λ_ρ , гидравлической крупности λ_ω , используемые нами при пересчете конструктивных и гидравлических параметров с природы на модель [2], приведены в табл. 1.

Фракционный состав наносов для модели был получен с использованием приведенных выше коэффициентов на основании фракционного состава русловых отложений, полученного нами на основании натуральных исследований [4]. Расчеты проводились в табличной форме (табл. 2) по следующей методике:

1. Используя натурные данные (столб. 1), определяем средний диаметр русловых отложений природы для каждой фракции d_i (столб. 2).

2. Используя формулу $d_{\text{ср.вз.н}} = \frac{\sum P_i \cdot d_i}{100}$ для

определения средневзвешенного диаметра частицы [5], где P_i – процентное содержание каждой фракции, d_i – средний диаметр русловых отложений, определяем средневзвешенный ди-

аметр русловых отложений реки, который равен d_{cp} вз.н=52,3 мм.

3. По табл. 11-1, 11-2 справочника [5] находим значение средней гидравлической крупности $w=f(d)$ русловых отложений в реке, $w=1010$ мм/с.

4. Используя переводной коэффициент гидравлической крупности из табл. 1, равный $\lambda_{\omega}=3,54$, пересчитываем на модель значение средней гидравлической крупности природы, которое соответственно равно $w=1010:3,54=285$ мм/с.

5. По табл. 11-1, 11-2 справочника [5] находим значение среднего диаметра русловых отложений на модели $d_{cp,вз.мод}=4,5$ мм.

6. Используя полученный нами масштабный коэффициент для пересчета диаметров русловых отложений, равный

$$\lambda_d = \frac{d_{cp,вз.н}}{d_{cp,вз.мод}} = \frac{52,31}{4,5} = 11,63,$$

пересчитываем диаметры донных природных отложений для модели (столб. 3).

На основании приведенной выше методики моделирования и соответствующих масштабных коэффициентов при моделировании русловых процессов на реке Кугарт были пересчитаны натурные значения расхода воды и наносов в модельные значения для дискретного

интервала времени, принятого для природы 6 ч. Значения сведены в табл. 3.

Модельная установка, смонтированная на гидротехнической площадке ОАО “Кыргызводпроект”, размещается в нижнем бьефе Аламединского отстойника, из которого и снабжается речной водой (рис. 2). Подача воды на модельную установку осуществляется самотеком из напорного бассейна по трубе диаметром 400 мм.

Через задвижку 1 для регулирования расхода вода поступает в колодец 2, на выходе из которого установлен мерный треугольный водослив Томсона 3. Далее вода попадает в услокоительный колодец 4 с сетчатым гасителем 5, откуда поступает в русло модельной установки.

Модельная установка представляет собой земляное канализованное русло протяженностью 30 м (рис. 3), что в природе составляет 6 км (рис. 4), копирующее продольное и поперечное сечение р. Кугарт [5].

Крепление откосов канализованного русла производилось с помощью цементации гравия. Дно русла отсыпалось песчано-глиняной смесью в соответствии с фракционным составом, приведенным выше. Установка и контроль высотных отметок в точках изменения уклона дна русла выполнялись нивелиром Н-3. Контроль за расходом воды, поступающей на модельную установку, осуществлялся при

Таблица 2

Фракционный состав русловых отложений природы и модели

Природа		Модель		Содержание русловых отложений по фракционному составу, %
Диаметр русловых отложений d, мм	Средний диаметр русловых отложений d _{ср} , мм	Средний диаметр русловых отложений d, мм	Средний диаметр русловых отложений d _{ср} , мм	
0,5...1	0,75	0,06	0,06	12
1...2	1,50	0,13	0,13	3
2...3	2,50	0,22	0,22	3
3...5	4	0,34	0,34	3
5...10	7,50	0,65	0,65	4
10...20	15,00	1,29	1,29	9
20...40	30,00	2,58	2,58	14
40...70	55,00	4,73	4,73	21
70...100	85,00	7,31	7,31	18
100...120	110,00	9,46	9,46	8
120...200	160,00	13,76	13,76	3
200...350	275,00	23,66	23,66	2

Таблица 3

Пересчет натуральных значений расходов воды и наносов для модели

Натура			Модель						
Время, ч	Расход воды, м ³ /с	Расход наносов, кг/с	Время, мин	Расход воды		Расход наносов, кг/с	Масса влеко- мых наносов, кг	Масса взвешенных наносов, кг	Полная масса наносов, кг
				м ³ /с	л/с				
0	0	0.00	0	0.000	0	0.0000	0.00	0.00	0.00
6	8	0.41	6	0.001	1	0.0015	0.58	2.30	2.88
12	17	2.04	13	0.002	2	0.0030	1.15	4.61	5.76
18	25	4.82	19	0.003	3	0.0045	1.73	6.91	8.64
24	33	8.71	25	0.004	4	0.0060	2.30	9.22	11.52
30	42	13.66	32	0.005	5	0.0075	2.88	11.52	14.40
36	50	19.64	38	0.006	6	0.0091	3.46	13.82	17.28
42	58	26.61	45	0.007	7	0.0106	4.03	16.13	20.16
48	67	34.57	51	0.008	8	0.0121	4.61	18.43	23.04
54	75	43.48	57	0.008	8	0.0136	5.18	20.74	25.92
60	83	54.42	64	0.009	9	0.0151	5.76	23.04	28.80
66	92	66.65	70	0.010	10	0.0166	6.34	25.34	31.68
72	100	79.97	76	0.011	11	0.0181	6.91	27.65	34.56
78	92	66.65	83	0.010	10	0.0166	6.34	25.34	31.68
84	83	54.42	89	0.009	9	0.0151	5.76	23.04	28.80
90	75	43.48	95	0.008	8	0.0136	5.18	20.74	25.92
96	67	34.57	102	0.008	8	0.0121	4.61	18.43	23.04
102	58	26.61	108	0.007	7	0.0106	4.03	16.13	20.16
108	50	19.64	115	0.006	6	0.0091	3.46	13.82	17.28
114	42	13.66	121	0.005	5	0.0075	2.88	11.52	14.40
120	33	8.71	127	0.004	4	0.0060	2.30	9.22	11.52
126	25	4.82	134	0.003	3	0.0045	1.73	6.91	8.64
132	17	2.04	140	0.002	2	0.0030	1.15	4.61	5.76
138	8	0.41	146	0.001	1	0.0015	0.58	2.30	2.88
144	0	0.00	153	0.000	0	0.0000	0.00	0.00	0.00
Всего							82.95	331.78	414.73

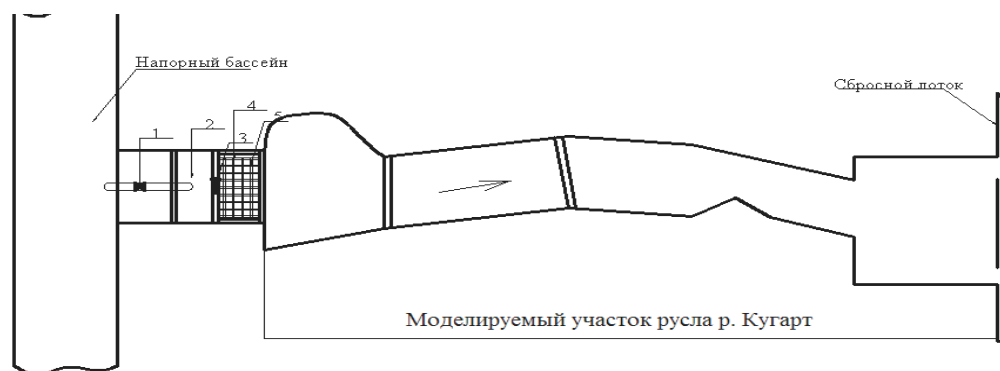


Рис. 2. Схема модельной площадки ОАО "Кыргызводпроект".



Рис. 3. Модельная установка.



Рис. 4. Исследуемый участок р. Кугарт (вид с самолета).

помощи тарированного треугольного водослива Томпсона, установленного на выходе из успокоительного колодца. Расход воды определялся по мерному водосливу по формуле Кинга $Q = 1.343H^{2.3}$ [5] и контролировался объемным способом.

Для определения напора H над мерным водосливом на удалении $5H$ установлен шпигетмасштаб с ценой деления нониуса $0,1$ мм. Плановые и высотные параметры модели, величина размывов в канализированном русле определялись на основе геодезических измерений. Отсчет по нивелиру брался по специально изготовленной рейке с ценой деления 1 мм. Контроль измерений состоял в трехкратном определении гидравлических величин, а также проверке экспериментальных данных путем их сравнения с расчетными проектными величинами.

Эксперимент проводился по следующему сценарию:

1. Велись подготовительные работы по заполнению дна русла песчано-глиняной смесью до проектной отметки (рис. 3).

2. Пуск расхода воды и подача определенного количества наносов проводились согласно расчетным параметрам (табл. 3).

3. Каждые 6 мин, согласно табл. 3, изменялся и подавался расход воды, и после чего в поток вносили необходимое количество донных и взвешенных наносов. Расход воды на модели изменялся от 0 до 11 л/с, что соответствует расходу на натуре 0 до 100 м³/с.

На рис. 5 показан паводок на модели, соответствующий расходу воды, равному 100 м³/с в натуре (см. вставка на рис. 5).



Рис. 5. Паводок 100 м³/с на р. Кугарт.



А



Б

Рис. 6. Деформация русла на подъеме паводка (А) и спаде паводка (Б).

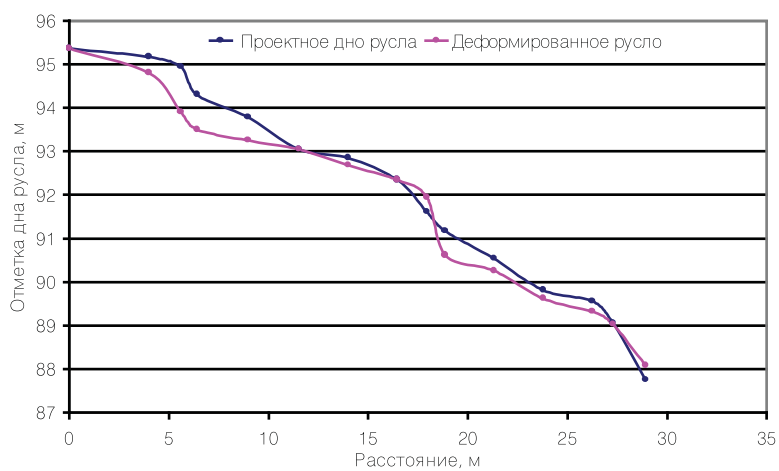


Рис. 7. Продольный профиль русла на модели до и после деформаций.

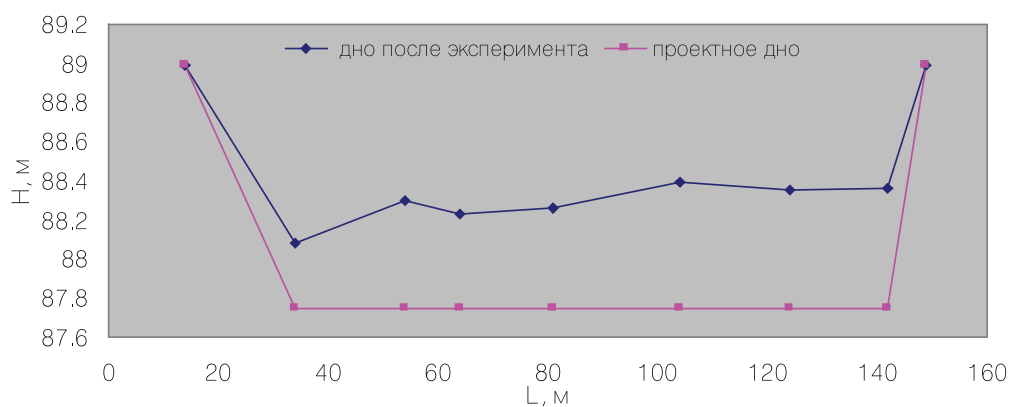


Рис. 8. Поперечное сечение русла до и после эксперимента в ПК 0+00 (конец канализованного русла).

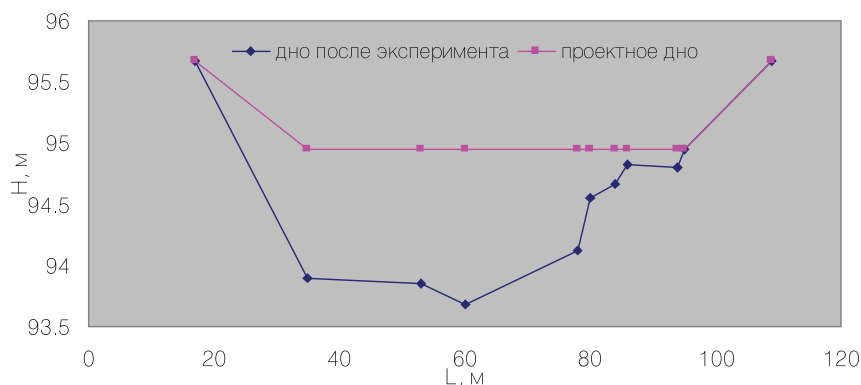


Рис. 9. Поперечное сечение русла до и после эксперимента в ПК 26+24 (за Сузакским мостом).

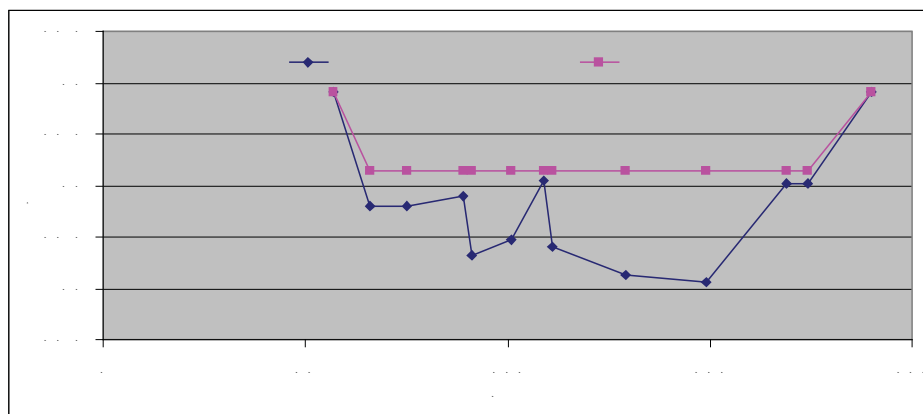


Рис. 10. Поперечное сечение русла до и после эксперимента в ПК 27+28 (за мостом Ош – Бишкек).

4. В течение всего эксперимента проводилась фото- и видеосъемка. Фотосъемка проводилась через каждые 6 мин; фиксировался процесс протекания расходуемой воды через определенные створы и связанная с этим деформация русла. Видеосъемка проводилась при минимальных и максимальных расходах воды, что позволило зафиксировать траекторию струи, а также процесс деформации русла при этом (рис. 6).

После проведения эксперимента была выполнена геодезическая съемка русла модели для выявления объемных и плановых деформаций русла и определения объема вымытого и намывного грунта (наносов).

Согласно данным геодезической съемки, были построены продольный профиль (рис. 7) и поперечные сечения канализированного русла реки Кугарт на модельной площадке (рис. 8–10).

Результаты эксперимента

1. При минимальных расходах воды (от 1–5 л/с) на модели, соответствующих 8–40 м³/с в натуре, происходит заиливание конечной части канализированного русла (рис. 8), что наблюдается и на натуре (рис. 11). В верхней части, наоборот, отмечаются деформации, обусловленные местными размывами русла реки.

2. При расходах воды от 5–11 л/с на модели (соответственно 40–100 м³/с в натуре) картина



Рис. 11. Конечная часть канализованного русла и разлив на р. Кугарт.

в нижней части канализованного русла не меняется, а процесс заиления происходит более интенсивно. Что касается верхней части, то здесь наблюдается сильный размыв русла, как показано на рис. 9, 10. Это обусловлено тем, что подпор нижнего бьефа канализованного русла на эксперименте не сформировался до того состояния, как на натуре. Это объясняет некоторое отличие модели от природы.

3. Для стабилизации руслового процесса на данном участке реки Кугарт нами предлагается производить очистку русла в месте разлива реки за канализованным руслом, что позволит предотвратить подпор потока. Благодаря очистке, процесс заиления в данном канализованном русле будет протекать медленней, что позволит избежать чрезвычайные ситуации в данном регионе.

4. Дальнейшим этапом модельных исследований является изучение русловых процессов на канализованном участке реки Кугарт при больших расходах паводка (200, 300 м³/с). После этого планируется сравнение данных проведенного исследованиями КPCY

физического эксперимента с результатами математического (компьютерного) моделирования русловых процессов, выполненного учеными университета Тренто (Италия) [3].

Литература

1. *Леви И.И.* Динамика русловых потоков. М.: Госэнергоиздат, 1957. – 195 с.
2. *Биленко В.А., Клепачев И.П.* Методика физического моделирования русловых процессов и защитно-регулирующих сооружений на примере реки Кугарт – Тараз.
3. Marco Tubino. Final report. Mathematical modelling of silting in the Kugart River, University of Trento – Dept. of Civil and Environmental Engineering – Project KG– FEP/ ASSP, 2005.
4. *Шаниро Х.Ш.* Регулирование твердого стока при водозаборе в оросительные системы. – М.: Колос, 1983. – 272 с.
5. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. – М.: Энергия, 1974. – 313 с.