

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИМЕНИ М. И. КАЛИНИНА

МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК

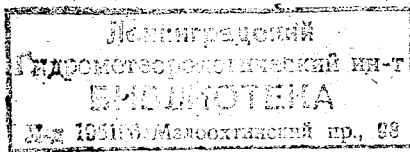
ВЫПУСК 63

# ГИДРОЛОГИЯ СУШИ

ДИНАМИКА ПОТОКОВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

244045

06  
718



ЛЕНИНГРАД  
1977

*Одобрено Ученым Советом  
Ленинградского гидрометеорологического института*

В статьях обобщены итоги натуральных наблюдений, полученных в экспедиционных условиях и на сети гидрометслужбы, и результаты экспериментальных работ по исследованиям гидравлических сопротивлений в руслах сложных форм сечений, транспорту наносов и гидроморфометрии. Значительное внимание уделено учету влияния потоков с наносами на различные виды гидротехнических сооружений.

Сборник рассчитан на специалистов, работающих в области гидравлики, гидрометрии, гидротехники и гидрологии суши, а также на аспирантов и студентов старших курсов гидрологических специальностей.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ответственный редактор — профессор **Б. Б. БОГОСЛОВСКИЙ**.

Члены редакционной коллегии: доцент **Н. Б. БАРЫШНИКОВ** (зам. ответственного редактора), заслуженный деятель науки и техники профессор **Б. В. ПРОСКУРЯКОВ**, профессор **К. Е. ИВАНОВ**, доктор геогр. наук **И. В. ПОПОВ**.

**СБОРНИК ПОДГОТОВЛЕН  
ЛЕНИНГРАДСКИМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ ИНСТИТУТОМ**

## ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУСЕЛ ПО ДЛИНЕ РЕКИ

Основные положения о значении изменения морфометрических характеристик по длине реки приведены в статье авторов [1]. В дополнение следует отметить значение этого фактора для расчетов пропускной способности русел при неравномерном движении потока. Так, Д. Е. Скородумов [2], анализируя данные специальных наблюдений за паводочным стоком на пойменных участках рек, предложил для расчетов скоростей течения выражение вида  $v = C\sqrt{R(I - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3)}$ , где член

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha_n v_n^2 - \alpha_v v_v^2}{2g L} \quad (1)$$

учитывает влияние неравномерного движения.

По нашим данным и данным Д. Е. Скородумова значение  $\varepsilon_1$  может достигать величины 55% от значения уклона свободной поверхности и в конечном счете зависит от изменения площадей сечения по длине реки. Действительно, принимая  $\alpha_n \approx \alpha_v$ , а значение расхода воды постоянным (для бесприточного участка допущение вполне приемлемо), и учитывая, что  $v = \frac{Q}{\omega}$ , подставляем эти значения в формулу (1). Тогда получим

$$\varepsilon_1 = \frac{\alpha Q^2}{2g L} \left( \frac{\omega_v^2 - \omega_n^2}{\omega_v^2 \cdot \omega_n^2} \right).$$

Полагая  $\frac{\alpha Q^2}{2g L} = \alpha' = \text{const}$ , будем иметь

$$\varepsilon_1 = \alpha' \left( \frac{\omega_v^2 - \omega_n^2}{\omega_v^2 \cdot \omega_n^2} \right).$$

Здесь  $C$  — коэффициент Шези;  $R$  — гидравлический радиус;  $I$  — уклон свободной поверхности;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  — инерционные члены, учитывающие отклонение режима от равномерного, установившегося;  $\alpha$  — корректив скорости; «н» и «в» — индексы, которые приписаны величинам, относящимся соответственно к нижнему и верхнему створам;  $L$  — длина участка;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $Q$  — расход воды;  $\omega$  — площадь сечения.

Следовательно, вес члена  $\varepsilon_1$  целиком и полностью определяется характером изменения площадей живого сечения по длине реки.

Изучение изменения морфометрических характеристик по длине реки необходимо для решения целого ряда проблем, в частности для подсчетов русловых балансов, расчетов трансформации волн паводков и попусков, судоходства и др. Исходя из этого, нами были продолжены исследования изменения указанных характеристик. В дополнение к приведенным в работе [1] изучены данные по рекам Вычегда, Большой Пит и частично по Оке (ширины русла).

На Вычегде для анализа использованы данные промеров на участке длиной 20,6 км. Средняя частота промерных поперечников составила 10—15 на 1 км. Участок реки по карте С. И. Пиньковского [3] представляет собой однорукавное русло, однако на участке наблюдается довольно мощная протока длиной около 7 км, образующая остров длиной 6,3 км. По-видимому, на этом участке наблюдается тип процесса — многорукавное русло.

Участок р. Большой Пит, длиной 10,8 км, по данным карты С. И. Пиньковского, также относится к немеандрирующему типу руслового процесса. Средняя частота расположения промерных поперечников 25—30 на 1 км.

Для определения характера изменения ширин по длине реки использован участок реки Оки общей длиной свыше 800 км, на котором наблюдались различные типы руслового процесса.

Изменение морфометрических характеристик ( $K_\omega$ ,  $K_B$ ,  $K_H = f(L)$ ) по длине реки представлено на рис. 1 (река Большой Пит), где  $K_\omega = \frac{\omega_i}{\omega}$ ,  $K_B = \frac{B_i}{B}$ ,  $K_H = \frac{H_i}{H}$ ,  $r = \frac{H_{\max}}{H_{\text{ср}}} - 1$ , т. е. в виде отношения

фактической величины характеристик к их осредненному для участка значению. Как видно на рисунке, характер изменения площадей, ширин и средних глубин циклический, причем кривая  $K_B = f(L)$  является зеркальным отображением кривой  $K_H = f(L)$ , что в какой-то степени можно объяснить соотношением  $B = \frac{\omega}{H}$ .

Однако в отдельных случаях изменение площадей сечения по длине реки несколько искажает зеркальность изменения  $B$  и  $H$ . Изменение указанных характеристик по длине весьма значительно. Например, площади сечения и глубины изменяются примерно в 3—5, а ширины в 2—3 раза как на реке Вычегде, так и на реке Большом Пите. Еще более значительны изменения ширин на реке Оке — в 11 раз. Это объясняется значительной протяженностью участка, на котором происходит существенное изменение расходов воды, чередованием плесовых и перекатных участков, геологией и рядом других причин.

Более конкретные данные об экстремальных, средних и значениях различной обеспеченности морфометрических характеристик рек приведены в табл. 1. Причем р. Ока, ввиду ее большой протяженности, разбита на участки различной длины в соответствии с типом руслового процесса.

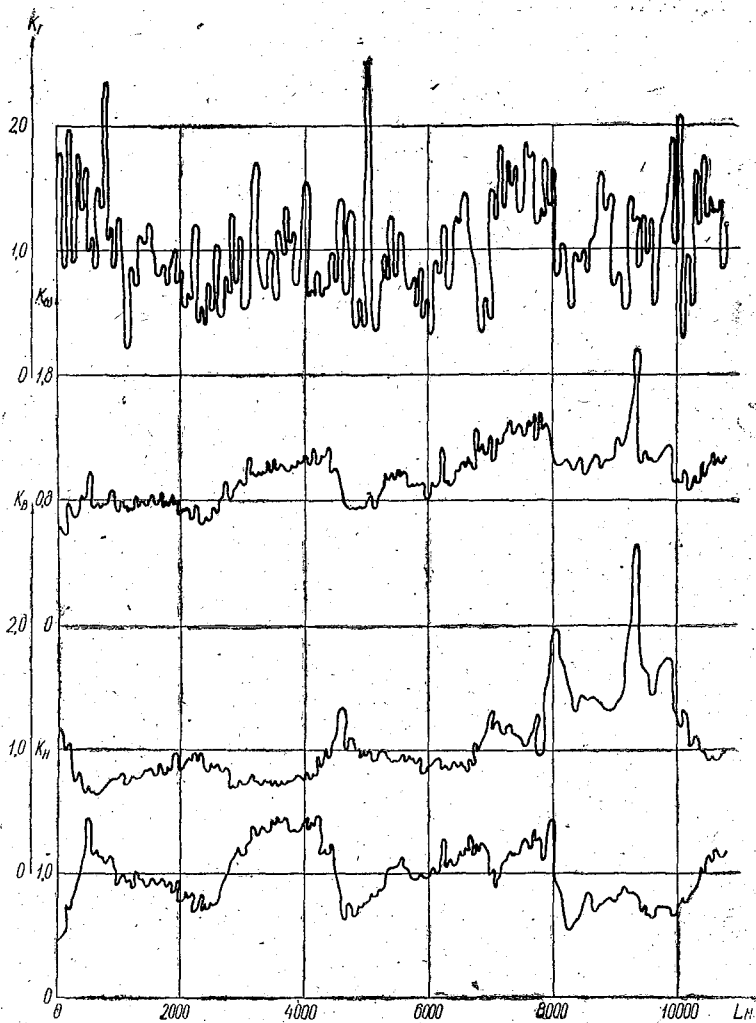


Рис. 1. Графики изменения относительных значений площадей живого сечения ( $K_{\omega}$ ), глубин ( $K_H$ ) и ширины русла ( $K_B$ ), а также параметра полноты сечения по В. Н. Гончарову ( $K_r$ ) по длине участка реки Большой Пит.

Помимо указанных выше характеристик, для каждого из поперечников были подсчитаны значения параметров формы сечения В. Н. Гончарова ( $\beta_r$ ) и Г. В. Железнякова ( $\beta_*$ ) [4, 5]. В качестве примера в табл. 2 приведены значения  $\beta_r$  и  $\beta_*$  для реки Северная Кельтма.

Как показывает анализ данных по всем исследуемым рекам, ход указанных значений является синхронным, расхождение значений  $\beta_r$  и  $\beta_*$  находится в пределах точности их расчета.

Таблица 1

Сведения об экстремальных, средних и значениях различной обеспеченности: площадей живого сечения, ширины и средних глубин на расчетных участках

Река	Значения параметров																	
	Площадь сечения, м <sup>2</sup>						Ширина, м						Средняя глубина, м					
	max	5%	сред.	95%	min	$\frac{\max}{\min}$	max	5%	сред.	95%	min	$\frac{\max}{\min}$	max	5%	сред.	95%	min	$\frac{\max}{\min}$
Кемь	2403	1900	538	150	79,0	31	544	462	210	94,0	58,0	9,4	7,63	6,40	2,30	1,00	0,64	12
Северная Кельтма	227	212	122	74,4	45,0	5,0	123	107	69,0	49,2	42,0	2,9	3,14	3,00	1,86	1,20	0,72	4,4
Вычегда	1064	880	473	208	189	5,6	562	476	265	143	122	4,6	3,36	2,69	1,75	1,19	1,08	3,1
Большой Пит	979	676	484	328	254	3,8	596	355	225	162	143	4,2	3,24	3,10	2,22	1,42	1,12	2,0
Тургай	—	—	—	—	—	—	34,0	34,0	22,0	12,3	9,00	3,8	5,00	4,84	2,12	0,20	0,20	25
Улу-Жиланчик	—	—	—	—	—	—	32,2	26,7	15,8	6,62	5,60	5,8	6,00	5,90	2,24	0,20	0,20	30
Карасу	—	—	—	—	—	—	29,0	25,9	12,0	1,74	1,70	17	3,20	2,85	1,20	0,18	0,12	27
Ишим	—	—	—	—	—	—	110	98,2	44,0	10,0	10,0	11	3,80	2,98	1,38	0,20	0,20	19
Уй	—	—	—	—	—	—	52,0	35,0	19,8	10,0	8,00	6,5	3,60	2,20	1,17	0,40	0,40	9,0
Терс-Акан	—	—	—	—	—	—	76,0	50,0	20,2	4,00	2,00	38	5,50	4,44	1,84	0,50	0,17	32
Ока	—	—	—	—	—	—	800	800	697	300	300	2,7	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	1000	900	573	300	300	3,3	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	440	440	311	395	395	1,1	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	500	480	228	100	100	5,0	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	500	490	282	215	200	2,5	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	400	380	262	200	200	2,0	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	500	490	348	240	220	2,3	—	—	—	—	—	—
Ока	—	—	—	—	—	—	770	750	435	300	300	2,6	—	—	—	—	—	—

Значения параметров формы сечения В. Н. Гончарова  
и Г. В. Железнякова (р. Северная Кельтма)

№ поперечника	Расстояние от постоянного начала, м	$\beta_r$	$\beta_*$
1	14,8	1,10	1,01
2	54,8	1,07	1,00
3	137,2	1,22	1,13
4	261,2	1,14	1,11
5	350,8	1,13	1,15
6	488,4	1,05	1,08
7	598,4	1,03	1,13
8	711,2	1,10	1,10
9	880,4	1,11	1,15
10	1180,4	1,18	1,09
11	1558,0	1,05	1,00
12	1744,4	1,08	1,01
13	1876,4	1,10	1,06
14	2314,0	1,12	1,14
15	2457,2	1,05	1,07

Учитывая аперриодический характер изменения исследуемых характеристик, нами была проведена их статистическая обработка, подсчитаны значения параметров  $C_v$  и  $C_s$  (табл. 3).

Анализ данных показывает, что исследуемые ряды для реки Большой Пит характеризуются меньшей изменчивостью, что объясняется многими факторами: типом руслового процесса, климатическими, физико-географическими, геологическими и другими условиями. Коэффициенты асимметрии ( $C_s$ ) характеризуются существенным отличием (табл. 3). Так на реке Большой Пит значение  $C_s$  для средних глубин — 0,14, для ширины — 2,46. На реке Вычегде соответственно — 1,22 и 0,82. Установить зависимость этого параметра ( $C_s$ ) от каких-либо определяющих факторов нам не представилось возможным.

Значения  $C_v$ , рассчитанные непосредственно по данным наблюдений (табл. 3) и по методу Г. А. Алексеева (табл. 4), близки между собой. В значениях  $C_s$  получились большие расхождения по всем расчетным параметрам, за исключением  $C_s$  средних глубин реки Большой Пит.

Значения коэффициентов  $C_v$ 

Река	Длина участка, км	$C_v$			$\omega$
		$\omega$	$B'$	$H_{ср}$	
Кемь	12,6	0,96	0,52	0,62	1,99
Северная Кельтма	13,9	0,34	0,23	0,29	0,53
Вычегда	20,6	0,49	0,40	0,26	0,56
Большой Пит	10,8	0,21	0,27	0,24	0,76
Терс-Акан	170	—	0,76	0,63	—
Уй	160	—	0,36	0,48	—
Тургай	120	—	0,32	0,63	—
Улу-Жиланчик	70	—	0,45	0,67	—
Ока	50	—	0,19	—	—
Ока	70	—	0,33	—	—
Ока	53,9	—	0,064	—	—
Ока	135,6	—	0,28	—	—
Ока	55,8	—	0,23	—	—
Ока	79,4	—	0,20	—	—
Ока	33,2	—	0,18	—	—
Ока	75,8	—	0,27	—	—
Карасу	—	—	0,57	0,76	—
Ишим	—	—	0,51	0,66	—



Таблица 3

и  $C_s$  расчетных параметров

$C_s$		$C_{vQ}$	Тип руслового процесса
$B$	$H_{ср}$		
1,28	1,76	0,23	Немеандрирующий (со слабо выраженным типом)
0,55	0,42	0,30	Свободное меандрирование
0,82	1,22	0,21	Русловая многорукавность
2,46	0,14	0,22	Немеандрирующий
1,73	0,36	1,10	Разветвленное русло
0,50	0,66	0,85	Свободное меандрирование
0,41	0,34	1,50	»
0,33	0,91	1,40	»
1,25	+	0,22	Незавершенное меандрирование
1,20	—	0,21	Свободное меандрирование
1,94	—	0,21	Незавершенное меандрирование
1,10	—	0,21	Свободное меандрирование
1,46	—	0,21	Ограниченное меандрирование
0,97	—	0,22	Свободное меандрирование
1,15	+	0,23	Незавершенное меандрирование
1,23	—	0,23	Свободное меандрирование
0,86	0,77	1,73	»
0,98	0,45	1,10	»

Таблица 4

Значения коэффициентов  $C_v$  и  $C_s$  расчетных параметров по Г. А. Алексееву.

Параметр	$C_v$	$C_s$	Норма	Среднее квадратическое отклонение $\sigma$
Река Вычегда				
$\omega$	0,48	1,35	463	215
$B$	0,41	1,54	264	108
$H_{ср}$	0,28	1,65	1,72	0,49
Река Большой Пит				
$\omega$	0,22	0,40	491	106
$B$	0,25	2,05	262	66
$H_{ср}$	0,23	0,16	2,23	0,51

Построение кривых обеспеченности для каждой из морфометрических характеристик производилось путем подбора теоретической кривой, соответствующей данным натурных наблюдений.

Для реки Большой Пит наилучшее соответствие для площадей живых сечений имеет теоретическая кривая обеспеченности, полученная при соотношении  $C_s=4 C_v$ . Соответственно для ширины — теоретическая кривая при  $C_s=5 C_v$ , а для средних глубин при  $C_s=2 C_v$  за исключением ее верхней части, где ряд точек оказывается за пределами кривой. Это можно объяснить редкой повторяемостью глубин, которым соответствуют данные со значениями 3,20—3,24 м.

Для реки Вычегды приняты соответствующие кривые обеспеченности: для ширины при  $C_s=4 C_v$ , для средних глубин —  $C_s=5 C_v$ . К эмпирическим данным о площадях живых сечений теоретическую кривую подобрать не удалось. Большое количество точек, соответствующих фактическим данным, отклоняется от расчетных кривых с любыми соотношениями  $C_s/C_v$ .

Значения  $C_v$  морфометрических характеристик зависят от типа руслового процесса и режима рек (рис. 2).

Проведенный анализ материалов и расчеты позволяют сделать ряд выводов:

1. Характер изменения средних глубин, ширин и площадей живого сечения русла по длине реки аperiодический. Он зависит от типа руслового процесса и изменчивости годового стока ( $C_{vQ}$ ).

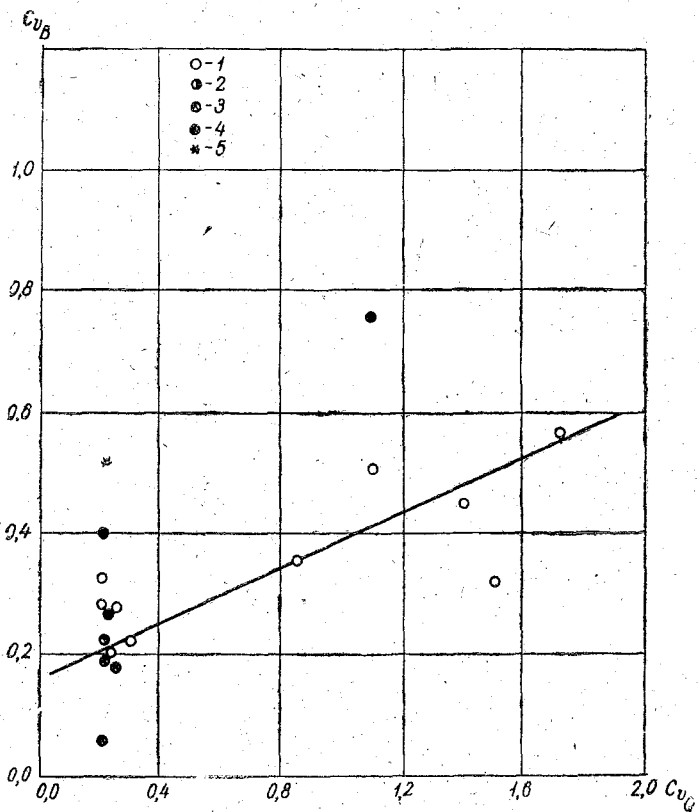


Рис. 2. Зависимость  $C_{vB} = f(C_{vQ})$  с учетом типа руслового процесса:

меандрирование — свободное (1); ограниченное (2); незавершенное (3); 4 — немеандрирующее русло; 5 — слабо выраженный тип руслового процесса.

2. Недоучет изменения морфометрических характеристик по длине реки при расчетах гидравлических характеристик, в частности скоростей потока, может привести к существенным ошибкам.

3. Необходимо продолжить разработки с целью выявления закономерностей распределения глубин, ширин и других характеристик по длине реки. Это позволит усовершенствовать методику планирования путевых работ на судоходных реках, расчетов трансформации волн паводков и ряда других расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б., Субботина Е. С. К вопросу об изменении морфометрических характеристик по длине реки. — «Метеорология и гидрология», 1976, № 3, с. 78—84.
2. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и эксплуатации кривых расходов воды. — «Тр. ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—96.
3. Пиньковский С. И. Карты основных типов русел рек СССР и методика ее составления. — В кн.: Тематическое картирование в СССР. Л., «Наука», 1967, с. 112—115.
4. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1962, 292 с.
5. Железняков Г. В. Теоретические основы гидрометрии. Л., Гидрометеиздат, 1968, 374 с.

А. А. ЛЕВАШОВ, С. В. ШМИДТ (ЛГМИ), О. М. СТРЕЛЬЧЕНЯ,  
И. М. КОВРИГИН (Иртышское бассейновое управление пути)

## ВЛИЯНИЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ НА РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫЕ В РУСЛЕ И НА БЕРЕГАХ РЕК

В последние годы резко повысился интерес различных народнохозяйственных организаций к районам Крайнего Севера, особенно Сибири и Дальнего Востока, расположенных в зоне залегания вечной мерзлоты, в связи с эксплуатацией огромных запасов полезных ископаемых, требующих интенсивного строительства различных магистралей и гидротехнических сооружений и особенно переходов через реки. Так значительная часть БАМ(а) пройдет по территории занимаемой вечной мерзлотой. Последняя в целом [1] занимает около 48% территории СССР.

Значительное количество водотоков, протекающих в районах залегания мерзлых грунтов различным образом взаимодействует с ними, оказывая существенное влияние на мерзлоту.

К сожалению, проектировщики, выполняя огромные объемы работ, часто вынуждены делать необоснованные допущения из-за недостаточной изученности вопроса влияния вечной мерзлоты на различные гидротехнические сооружения и на русловые процессы, что ведет к увеличению их стоимости и недостаточной обоснованности проектов. Ленинградским гидрометеорологическим институтом в течение 1968—1974 гг. [2] проводились специальные исследования на отдельных участках рек Надым, Полуй, Пур с целью определения влияния вечной мерзлоты на русловые процессы и строительство переходов через реки. Итогам обобщения результатов этих наблюдений и посвящена данная работа.

В указанной зоне, кроме обычного механического размыва, действует термоэрозия, являющаяся специфической ее особенностью. Влияние этих факторов зависит от размеров объекта исследования. Установлено, что на крупных реках мерзлота под руслами отсутствует и встречается только на поймах и берегах, наличие последней осложняет процесс деформации по сравнению с аналогичными реками, протекающими вне мерзлотной зоны.

На малых реках мерзлота встречается не только на поймах и берегах, но и под руслами и существенно уменьшает скорость деформации. Наблюдениями 1968—1974 гг. установлено повсеместное распространение мерзлоты в виде таликов на пойме реки

Надым, т. е. мерзлота носит островной характер. Глубина залегания ее от поверхности поймы после окончания периода сезонного оттаивания колеблется от 0,3 м (под мхами) до 3,5 м (на оголенных песках).

Полевыми наблюдениями и расчетами глубины промерзания по формуле Б. В. Проскурякова [3]

$$x_1 = \sqrt{\frac{-2\lambda_1(\Theta - t_0)(\tau - \tau_0)}{w} + (\beta + x_0)^2} - \beta \quad (1)$$

установлено, что на пойменных участках и крупных мезоформах возможны перелетки (мерзлые прослойки).

Здесь  $\lambda_1$  — теплопроводность мерзлого грунта;  $\Theta$  — температура воздуха;  $t_0$  — температура промерзания почвы;  $\tau$  — время промерзания почвы;  $\tau_0$  — время промерзания почвы, от которого начат расчет;  $w$  — количество тепла, необходимое для замерзания одной объемной единицы грунта;  $x_0$  — начальная глубина промерзания;

$$\beta = h \frac{\lambda_1}{\lambda_c} - \frac{\lambda_1}{a},$$

где  $h$  — толщина снежного покрова;  $\lambda_c$  — теплопроводность снега;  $a$  — коэффициент теплоотдачи снег — воздух.

Для определения толщины слоя оттаивания при наличии фильтрационного потока использовалась также формула Б. В. Проскурякова [3]

$$x_2 = \frac{\sqrt{\lambda_2 C_2 \gamma_2}}{w \sqrt{\pi}} \cdot (T - t_0) \sqrt{\frac{v}{y}} (\tau - \tau_0), \quad (2)$$

где  $\lambda_2$ ,  $C_2$ ,  $\gamma_2$  — соответственно теплопроводность, теплоемкость и удельный вес талого грунта;  $T$  — температура влажного грунта в начальный момент времени;  $v$  — скорость фильтрационного потока (для Надымских песков принималась равной 1 м/ч);  $y$  — длина пути фильтрационного потока под промерзающим грунтом до точки, где определяется глубина промерзания.

В таблице приведены результаты сравнения фактических и рассчитанных по формулам (1) и (2) размеров перелетков при средней высоте снежного покрова, равной 0,35 м и средней многолетней температуре воздуха.

Натурные наблюдения над величиной перелетков проведены по прирусловым участкам поймы. Из таблицы видно, что при уменьшении влажности грунтов величины промерзания и толщина перелетков увеличиваются.

• Расчетные и натурные значения глубин промерзания и протаивания

Влажность грунта в долях единицы	Глубина, м		Толщина перелетков	
	промерзания	протаивания	расчетная	натурная
0,25	2,6	2,5	0,1	
0,15	3,5	3,0	0,5	1,10
0,10	4,3	3,3	1,0	

Глубина залегания верхней поверхности мерзлых грунтов на поймах, зависит от характера почв, растительного покрова и других факторов и колеблется в значительных пределах. Весьма существенным ускорителем деформаций является нарушение растительного покрова пойм вызывающее, как правило, интенсивную эрозию, а также создание благоприятных условий для морозного выветривания, которое за один сезон может разрушить склоны на несколько метров. Различные сооружения, построенные на поймах, в частности трубопроводы, обогревая почвы, вызывают их деформации.

При выполнении монтажных, земляных и тому подобных работ с нарушением растительного покрова меняется температурный режим грунтов поймы, что способствует оттаиванию грунтов и может привести к значительным деформациям. При нарушении сплошности растительного покрова на береговых склонах возможны оползневые (солифлюкционные) явления. Примером таких явлений могут служить крутые склоны берегов р. Полуя. Особенно часто эти явления наблюдаются на хорошо прогреваемых склонах южной экспозиции.

Глубокое промерзание увлажненных грунтов сопровождается пучением. Так, многие свайные мосты через мелкие притоки р. Полуя в результате процессов пучения оказались деформированными.

Типы русловых процессов на равнинных реках Западно-Сибирской низменности в условиях распространения вечной мерзлоты близки к аналогичным на реках немерзлотной зоны [4].

По итогам полевых исследований ЛГМИ, выполненным в 1968—1973 гг., установлено, что на реках этой зоны встречаются практически все типы русловых процессов, приводимые в классификации ГГИ. Например, р. Полуя развивается по схеме свободного меандрирования. На реках Надыме, Пуре и Тазе наблюдается русловая и пойменная многорукость. В отдельных протоках этих рек имеют место побочный и ленточногрядовый типы процессов.

В то же время на русловой процесс этих рек мерзлота оказывает существенное влияние, мерзлые грунты, на наш взгляд, выступают в роли ограничивающего искажающего фактора, как пра-

вило, замедляющего ход русловых деформаций. Так, на р. Полуе наблюдаются хорошо развитые пеглеобразные меандры, ширина перешейков которых свыше 30 лет продолжает оставаться равной одной-двум ширинам русла (около 100 м) [5]. На этих перешейках в конце августа наблюдалась повсеместно на глубине 1,5—2,0 м мерзлота. Именно она и является фактором замедляющим процесс деформаций. Скорость подмыва берегов в этом случае не превышает 1—2 м/год [6].

Вторым важным фактором, осложняющим нормальный ход русловых деформаций, являются ледоходы на реках, текущих с юга на север, а практически все реки Сибири и Востока текут с юга на север. Ледоходы, как правило, сопровождаются мощными заторами, в процессе которых русловой лед выталкивается на берега и поймы, вызывая деформации береговой растительности и самих берегов. Примером этого может служить размыв берега одной из проток р. Надым, достигший 40 м за 5—6 часов (см. рисунок).

Фактором, осложняющим морфологию русловых и пойменных образований является погребенный лед. Вытаивание такого льда приводит к появлению термокарстовых воронок, рыхлению, а следовательно, и более интенсивному поступлению наносов в реки.

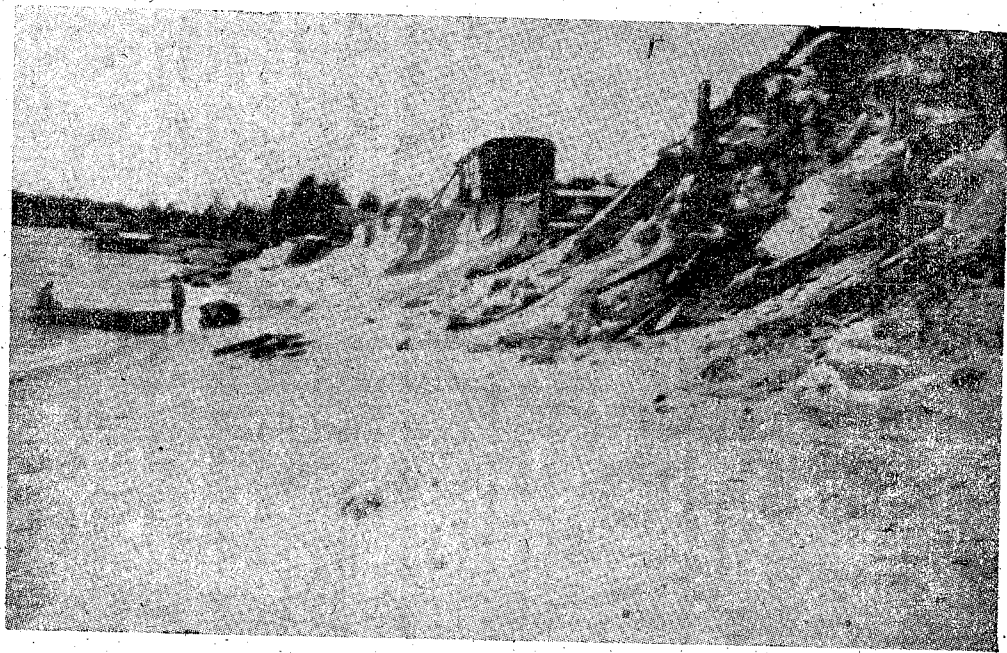
На русловых образованиях р. Надым особенно в ухвостьях побочней и осередков часто наблюдаются провальные воронки и трещины от вытаивания погребенного льда.

В северных и особенно северо-восточных районах Союза, существенное влияние на формирование русел и пойм оказывают наледи. Вопросы их образования, распространения и влияния на жидкий сток посвящены исследования Б. Л. Соколова, А. М. Догановского и др. Однако ни в одной из них влияние наледей на русловые процессы не рассматривается.

Речные наледи широко распространены особенно на промерзающих реках северо-востока страны, на поймах, склонах речных долин и у их подножий. Они часто перекрывают всю долину, аккумуляруя часть осенне-зимнего стока в виде твердой фазы и расходуя ее в весенне-летний период. Стесняя русло, наледи вынуждают поток растекаться и тем самым способствует распластыванию русла и образованию многоруканности, близкой к внутренним дельтам рек.

По данным наблюдений перемещение донных наносов на реках мерзлотной зоны, русла которых сложены песками, происходит в основном в виде донных гряд. Высота таких гряд достигает 3,5 м, а величина расхода донных наносов в межень изменяется на протяжении стокилометрового участка реки от 1,0 до 10 кг/с. Сопоставление рассчитанных по формулам В. Н. Гончарова [7], Ю. М. Корчохи [8] и ВСН-01-73 [9] с натурными данными показало их близкое соответствие. Это дает возможность сделать вывод о применимости расчетных методов, разработанных для равнинных рек ЕТС, к рекам, протекающим в зоне залегания вечной мерзлоты. В то же время вечная мерзлота может быть причиной





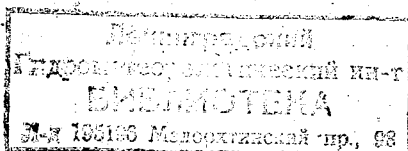
Размыв вогнутого берега протоки при заторе льда в главном русле р. Надым.  
(107 км от устья) 1971 г.

резко увеличенного поступления наносов в реки в период открытого русла, вызванного различными формами ее проявления (оползни, солифлюкации, термокарст и др.), а также в результате выпаживания льдом в период ледохода.

Кроме изучения влияния вечной мерзлоты на русловые процессы, был рассмотрен ряд вопросов, оказывающих влияние на судоходные условия на реках. В частности, установлена зона выклинивания подпора (от р. Оби) на реке Надым (80 км от устья) и величина понижения бытовых уровней из-за дноуглубительных работ. Также проводились систематические исследования водного режима ряда характерных участков реки Надым для осуществления капитальных мероприятий (выпрямления и регулирования русел) по улучшению судоходных условий реки на длительный период с целью обеспечения увеличения перевозок по реке Надым, необходимых для газового и нефтяного хозяйства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Попов А. И., Тушинский Г. К. Мерзлотоведение и гляциология. М., «Высшая школа», 1973, с. 46—61.
2. Барышников Н. Б., Левашов А. А., Шмидт С. В. Русловые процессы на реках, протекающих в горных районах и в зонах многолетнемерзлых грунтов. — Тезисы докладов на IV Всесоюзном Гидрологическом съезде, секция русловых процессов. Л., 1973, с. 18—19.
3. Проскуряков Б. В., Волков С. И. Расчет замерзания и оттаивания болот. — «Тр. ГГИ», 1945, вып. 19, с. 3—21.
4. Попов И. В. Русловые деформации и гидротехническое строительство. Л., Гидрометеиздат, 1969, 363 с.
5. Субботина Е. С., Шмидт С. В. Некоторые особенности деформации речных русел и пойм в условиях многолетнемерзлых грунтов. — «Тр. ЛГМИ», 1972, вып. 46, с. 39—44.
6. Левашов А. А., Шмидт С. В. К вопросу о деформациях русла и поймы р. Надым. — «Тр. ЛГМИ», 1972, вып. 46, с. 32—38.
7. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1962. 374 с.
8. Корчох Ю. М. Некоторые результаты исследования песчаных гряд в натуральных условиях. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук, Л., 1969. 20 с. (ГГИ).
9. Указания по расчету стока наносов ВСН 01-73. Л., Гидрометеиздат, 1974. 24 с.



---

Н. Б. БАРЫШНИКОВ, А. Б. КАРЕКАНОВ (ЛГМИ),  
Л. С. КУРДУБОВ (ГГИ)

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА С МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ И ДЕФОРМАЦИЙ У СООРУЖЕНИЙ

Непрерывное увеличение среднего веса поездов и пропускной способности железных дорог предъявляет повышенные требования к условиям их эксплуатации и, в частности, к надежности работы водопропускных сооружений на них. Ряд таких сооружений был спроектирован и построен в предвоенные годы по устаревшим нормам, а в отдельных случаях, особенно в период Великой Отечественной войны, даже без учета каких-либо норм. Это существенно осложняет эксплуатацию дорог, приводя в отдельных случаях к авариям на них. Исходя из этого, Министерство путей сообщения обязало региональные управления выполнить обследование и произвести классификацию малых водопропускных сооружений на железных дорогах. При этом предусматривается комплексное полевое обследование указанных сооружений в целях определения их состояния (подходы к сооружениям, отложение наносов в них, размыв нижних бьефов, насыпи ниже сооружений и др.) и возможности пропуска расходов воды расчетной обеспеченности.

Основным инструктивным документом по обследованию и классификации малых водопропускных сооружений являются Методические указания, сущность которых изложена в работе Л. Г. Бегама и Г. Я. Волченкова [1]; отдельные положения Указаний, на наш взгляд, нуждаются в существенной корректировке.

Сотрудники кафедры гидрометрии ЛГМИ на протяжении трех лет (1973—1975 гг.) проводили полевые работы и анализ полученных данных по обследованию и классификации малых водопропускных сооружений на различных участках Свердловского управления железных дорог. За этот период в общей сложности было обследовано около 100 сооружений.

В настоящей статье приведены итоги этой работы и разработки, направленные на уточнение некоторых положений действующей инструкции. Эти разработки, как нам представляется, можно под

разделить на две группы: к первой относится анализ полевых данных и предложения, посвященные улучшению методики расчета максимальных расходов воды 1%-ной и 0,33%-ной обеспеченности, притекающих к малым водопропускным сооружениям; ко второй — вопросы, связанные с деформациями русел ниже сооружений и отложением наносов в них.

Расчет пропускной способности сооружения основан на гидравлических формулах и максимальных расходах 1%-ной и 0,33%-ной обеспеченности. Гидравлические формулы можно считать достаточно надежными и объективными, чего нельзя сказать о методике расчета максимальных расходов 1%-ной и 0,33%-ной обеспеченности. Учитывая, что любая насыпь железнодорожного полотна в период паводков выполняет роль подпорного сооружения, создающего водохранилище той или иной емкости, следует так же кратко остановиться на проблеме трансформации им паводочной волны, существенно влияющей на методику расчетов. Поэтому основное внимание в данной работе будет уделено вопросам методики расчета максимальных расходов 1%-ной и 0,33%-ной обеспеченности и их трансформации перед сооружением за счет аккумуляции части паводочного стока временным водохранилищем, возникающим перед сооружением.

Эти вопросы рассматриваются в связи с тем, что малые водопропускные сооружения расположены в бассейнах водотоков, площади водосборов которых очень малы и составляют от долей до нескольких квадратных километров (табл. 1). Как известно, постоянно действующие посты наблюдений за стоком таких малых рек в системе гидрометслужбы либо вообще отсутствуют, либо очень редки, что затрудняет подбор рек-аналогов.

Методические указания допускают расчет расходов заданной обеспеченности только путем обработки рядов данных о наблюдаемых горизонтах воды, которые, к сожалению, являются короткими и недостаточно надежными. В случаях, когда имеются сведения только о нескольких наивысших уровнях за период в  $n$  лет, предлагается дополнить их данными об уровне, повторяющемся в среднем 1 раз в 2 года ( $p=50\%$ ), точность определения которого представляется недостаточной (их определение, как правило, осуществляется опросом линейных работников службы пути).

Если могут быть собраны сведения только по одному наивысшему уровню (и соответствующему расходу) у сооружения, то расходы заданной обеспеченности должны определяться по инструкции для расчета стока с малых бассейнов ВСН 63-67 [2] для летних паводков и СН 435-72 [3] для весеннего половодья.

Одним из основных параметров формул, рекомендованных этими инструкциями, является площадь водосбора, которая далеко не всегда может быть определена вследствие отсутствия картографического материала соответствующего масштаба для некоторых районов и ряду других причин.

Как известно, съемки бассейнов рек в заболоченных и залесенных районах весьма дороги, и не всегда могут быть признаны рентабельными. К тому же, даже при наличии съемок, возникают трудности точного определения площадей водосборов и других параметров, необходимых для расчетов по формулам, на малых реках, водосборы которых заболочены или нечетко выражены. Это объясняется нетипичностью формы водосборов, наличием на них водоотводящих канав, искажающих картину естественного стока. Предполагается, что расчеты выполняются для замкнутых водосборов, при этом не учитывается возможность попадания части стока с них в соседние за счет аккумуляции перед сооружениями.

Эти трудности приводят к необходимости применения косвенных методов расчета максимальных расходов воды заданной обеспеченности. Сущность этой косвенной методики заключается в следующем.

По данным полевых обследований определяются горизонты высоких вод перед сооружениями за максимально возможный период  $n$  (обычно не превышает 10—15 лет), их происхождение и годы, в которые они наблюдались.

По гидравлическим формулам, согласно «Методическим указаниям» [1], вычисляются расходы воды через сооружение при этих горизонтах.

Интенсивность дождей для большинства районов значительно превышает интенсивность снеготаяния, и на малых водосборах максимальные расходы воды наблюдаются именно в период летних паводков. Однако за счет аккумуляции перед сооружением максимальные расходы летних паводков значительно снижаются. Их объемы малы по сравнению с объемами весенних половодий. В табл. 1 приведены объемы паводков и половодий, соответствующие расходам 1%-ной обеспеченности, рассчитанные для водосборов, по которым имелись надежные натурные материалы. Как видно из табл. 1, объемы летних паводков для исследованных водосборов составляют от 0,8 до 10% от весенних.

Снижение максимальных расходов весеннего половодья за счет аккумуляции стока перед сооружением незначительно в связи с малым объемом создающегося водохранилища и большим объемом весеннего стока. Поэтому максимальные расходы воды притекающей к сооружению, незначительно (от 1,4 до 4,3%, кроме заболоченных водосборов) отличаются от максимальных расходов воды, проходящей через него (табл. 2).

Резко отличная картина наблюдается при пропуске летних паводков. Вследствие их малого объема, соизмеримого с объемом временного водохранилища, максимальные расходы воды, пропускаемые сооружением, значительно меньше соответствующих притекающих к нему (табл. 2).

Объемы весеннего и летнего паводков

Таблица 1

Пункт наблюдения у сооружения, км	Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup>	Объемы паводков при $Q_{1\%}$		$\frac{W_{л}}{W_{в}}$ , %
		весеннего $W_{в}$ ( $10^3 \cdot \text{м}^3$ )	летнего $W_{л}$ ( $10^3 \cdot \text{м}^3$ )	
292	0,33	115	7,7	6,7
69	4,25	1480	22,8	1,5
79	9,70	3400	55,0	1,6
108	1,19	416	6,4	1,5
120	0,97	340	5,2	1,5
121	1,13	396	3,3	0,8
157	2,15	750	11,5	1,5
76	0,73	256	4,8	1,9
19	1,00	350	5,4	1,5
112	1,16	405	22,7	5,6
63	1,89	660	37,0	5,6
14	0,88	308	30,8	10,0
51	0,85	297	19,1	6,4
108	0,96	336	21,5	6,4
66	1,32	462	27,8	6,0
13	0,18	63	3,2	5,1

Таблица 2

Уменьшение максимальных расходов воды за счет аккумуляции перед сооружениями

Пункт наблюдения у сооружения, км	Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup>	Максимальные расходы ( $P=1\%$ )						Примечание
		весеннего половодья			летнего паводка			
		$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_{ак}$ , м <sup>3</sup> /с	$\frac{Q-Q_{ак}}{Q}$ , %	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_{ак}$ , м <sup>3</sup> /с	$\frac{Q-Q_{ак}}{Q}$ , %	
292	0,33	0,68	0,67	1,5	4,07	2,68	34	
60	4,25	0,28	0,27	3,5	0,91	0,70	23	Заболочен
79	9,70	0,73	0,72	1,4	1,05	0,90	14	
108	1,19	1,24	1,12	10	0,26	0,09	65	Заболочен
120	0,97	1,52	1,49	2,0	2,24	1,40	33	
121	1,13	0,99	0,97	2,0	0,46	0,36	22	
157	2,15	0,58	0,57	1,7	0,59	0,50	15	
112	1,16	3,15	6,08	2,3	3,12	1,60	48	
19	1,00	1,40	1,34	4,3	0,30	0,20	33	
63	1,89	3,65	3,25	11	6,25	2,10	68	Заболочен
14	0,88	2,25	2,18	3,1	0,79	0,59	25	
51	0,85	1,43	1,39	2,8	4,70	1,30	72	
108	0,96	1,45	1,30	5,5	4,70	0,70	85	Заболочен
66	1,32	1,58	1,50	5,1	6,38	1,50	76	Заболочен
13	0,18	1,10	0,92	19	0,40	0,16	60	Заболочен

Так например, максимальный расход 1%-ной обеспеченности летнего паводка ( $Q$ ), притекающий к сооружению на 120-ом километре, составляет  $2,24 \text{ м}^3/\text{с}$ , а через сооружение соответственно проходит только  $1,40 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Q_{\text{ан}}$ ), т. е. на 33% меньше. Значительная часть объема паводка ( $1360 \text{ м}^3$ , т. е. 26%) пошла на заполнение аккумулирующей емкости.

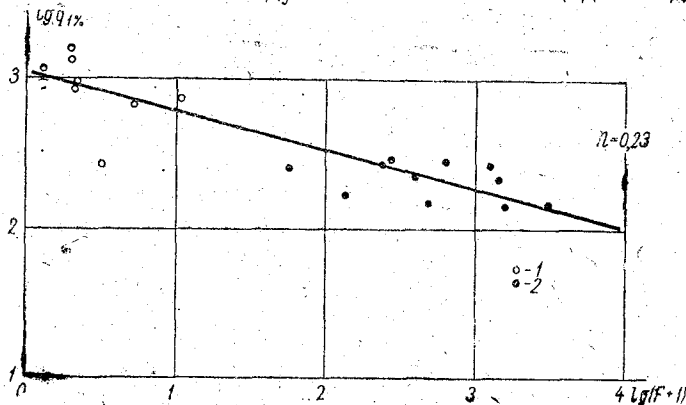
Соответственно в период весеннего половодья максимальный расход притока составляет  $1,52 \text{ м}^3/\text{с}$ , а расход через сооружение с учетом аккумуляции —  $1,49 \text{ м}^3/\text{с}$ . Таким образом за счет аккумуляции максимальные расходы уменьшаются только на 2%, что находится в пределах точности расчетов. Аккумулирующая емкость в этом случае составит  $2600 \text{ м}^3$ , т. е. 0,8% объема стока.

Так как максимальные расходы воды весеннего половодья с учетом аккумуляции незначительно отличаются от соответствующих вне зоны подпора, то можно считать, что максимальные подпертые горизонты за период  $n$  лет соответствуют максимальному расходу с данного водосбора за этот же период.

Повторяемость максимальных расходов воды устанавливается анализом гидрологических и метеорологических характеристик данного района методом подбора аналогов, имеющих продолжительные ряды наблюдений.

Районные коэффициенты вариации и асимметрии максимальных расходов воды для малых водосборов этого района определяются на основании анализа режимных материалов. Используя районные значения параметров кривых обеспеченности и переходные коэффициенты от одной обеспеченности к другой, находят расходы заданной повторяемости.

Для уточнения повторяемости максимальных расходов воды, рассчитанных этим способом, была построена региональная зависимость максимального модуля стока от площади водосбора



Зависимость максимального модуля стока от площади водосбора:

1 — данные по водосборам, обследованным ЛГМИ; 2 — данные УГМС.

$q_{\max} = f(F+1)$  (см. рисунок). Для ее построения использованы максимальные расходы всех обследованных водосборов данного района, для которых имеются данные об их площадях и максимальные расходы по данным наблюдений УГМС на реках этого района. На рисунке приведена редуцированная зависимость для одного из исследуемых районов. Результаты расчетов сведены в табл. 3.

При построении зависимости, приведенной на рисунке, снижение максимальных расходов весеннего половодья за счет аккумуляции перед сооружением не учитывалось, ибо оно не превышает точности расчетов.

Таблица 3

Модули стока с малых водосборов

Пункты наблюдений	Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup>	Модуль стока $q_{1\%}$ , л/с с км <sup>2</sup>
Данные расчетов		
292 км участок Чусовская-Гороблагодатская	0,33	2020
60 км участок Кушва-Серов	4,25	663
79 км	9,70	740
108 км	1,19	940
120 км	0,97	1540
121 км	1,13	860
157 км	2,15	265
76 км участок Серов — Сосьва	0,73	535
19 км участок Серов — Покров-Уральский	1,0	1340
Данные УГМС		
р. Тура — Азиатская	244	272
р. Юрья — Вторая Шумовка	278	290
р. Сосьва — Тренькино	1260	266
р. Кемья — в/п № 8	136	165
р. Тура — Карпинск	480	148
р. Каква — Полуговка	1500	214
р. Каква — Серов	1590	138
р. Сотрина — Сотрино	403	224
р. Ляля — Солтановка	3010	150
р. Вагран — Березовый	645	282
р. Липовка — Липовка	58	257



Редукционный коэффициент этой зависимости  $n=0,23$  находится в близком соответствии с районным коэффициентом, подтверждая тем самым правильность определения расходов воды 1%-ной обеспеченности.

В табл. 4 приведены результаты расчета расходов воды 1%-ной обеспеченности по данной методике и по методике СН 435-72 [3] (для водосборов, на которых имелись расчетные характеристики).

Таблица 4

Расчетные значения максимальных расходов воды 1%-ной обеспеченности по методикам ЛГМИ и СН 435-72

Пункт наблюдения у сооружения, км	Площадь водосбора $F$ , км <sup>2</sup>	Расходы воды ( $P=1\%$ )		$\frac{Q_{СН} - Q_{ЛГМИ}}{Q_{ЛГМИ}}$ , %
		по методике ЛГМИ $Q_{ЛГМИ}$ , м <sup>3</sup> /с	по СН 435-72 $Q_{СН}$ , м <sup>3</sup> /с	
292	0,33	0,67	0,40	40
60	4,25	0,27	3,24 (0,43) <sup>1</sup>	1100 (59)
79	9,70	0,72	3,02 (0,50) <sup>1</sup>	320 (81)
108	1,10	1,12	0,38	66
120	0,97	1,49	1,05	29
121	1,13	0,97	0,54	44
157	2,15	0,57	1,28	90
76	0,73	0,39	0,49	26
19	1,00	1,34	1,12	16
112	1,16	3,08	2,49	19
53	0,52	0,81	1,19	47
63	1,89	3,25	3,70	14
14	0,88	2,18	3,06	40
43	0,88	0,57	1,96 (0,87) <sup>1</sup>	244 (53)
51	0,85	1,39	1,89	36
108	0,96	1,30	2,12	63
66	1,32	1,50	2,79	86
13	0,18	0,92	0,50	46

<sup>1</sup> Большая часть стока осуществляется транзитом мимо сооружения. По приближенной оценке по гидравлическим формулам мимо сооружения на 60 км проходит 2,81 м<sup>3</sup>/с (через сооружение 0,43 м<sup>3</sup>/с), на 79 км соответственно — 1,52 м<sup>3</sup>/с (0,50 м<sup>3</sup>/с), а на 43 км — 1,09 м<sup>3</sup>/с (0,87 м<sup>3</sup>/с).

Как видно из табл. 4, расчет по формулам СН 435-72 [3] может привести к значительным ошибкам при определении категории водопропускных сооружений. Это происходит из-за недоучета в рекомендуемой формуле всего многообразия природных условий, свойственных каждому водосбору. При расчетах же с использова-

нием натуральных наблюдений закономерности, присущие конкретному водосбору, учитываются в гораздо большей степени.

В случаях, когда высшие горизонты перед сооружением наблюдались в период дождевых паводков (большие уклоны водосборов, значительная интенсивность дождя, что характерно для предгорных районов), возникает трудность в определении обеспеченности расхода воды через сооружение при этом горизонте. Максимальные расходы паводка при аккумуляции перед сооружением значительно снижаются. Величина этого уменьшения зависит от объема стока за паводок. Поэтому максимальный расход через сооружение за  $n$  лет не всегда соответствует максимальному расходу выше сооружения (вне зоны подпора). В таких случаях предварительно необходимо проверить, существует ли связь между максимальными расходами и объемами стока за паводок в этом районе. Эту проверку можно осуществить по данным наблюдений УГМС или материалам стоковых станций. Если такая связь в данном районе существует, то можно считать, что максимальные расходы через сооружение, с учетом подпора за период паводка, соответствуют максимальным расходам паводка вне зоны подпора. Тогда, аналогично случаю весеннего половодья, по данным УГМС подбирается аналог и определяется обеспеченность этого наблюдаемого расхода, а затем осуществляется переход к заданной обеспеченности. Следует отметить, что подбор аналога в таких случаях затруднен по сравнению с весенним половодьем, вследствие большой пестроты интенсивности ливневых осадков, которые в основном и вызывают значительные паводки.

В случае отсутствия связи между максимальными расходами и объемами паводков приходится довольствоваться положением, что наблюдаемый расход (горизонт) через сооружение является максимальным за какой-то период (как выше указывалось обычно около 15 лет) и определять обеспеченность расхода по этому периоду, что может привести к значительным ошибкам. Разработка методики определения расходов воды заданной обеспеченности в этом случае является задачей дальнейших исследований.

В процессе полевых работ было выполнено обследование малых водопропускных сооружений с целью определения их заносимости и величины местного размыва в нижних бьефах.

Отложение наносов наблюдалось в семи трубах из 56, что составляет 13% от общего числа обследованных сооружений. Толщина слоя наносов достигала 35 см (табл. 5). Для всех обследованных труб по формуле В. Н. Гончарова для связанных грунтов [4, с. 127]

$$v_n = \left( \lg \frac{8,8R}{d} \right) \sqrt{\frac{2g}{1,75 \gamma_0} (\gamma_s - \gamma_0) d}, \quad (1)$$

где  $v_n$  — неразмывающая скорость;  $R$  — гидравлический радиус;  $d$  — средняя крупность зерен;  $\gamma_0$  — удельный вес воды;  $\gamma_s$  — эквивалентный фиктивный удельный вес;  $g$  — ускорение силы тяжести,

были подсчитаны критические скорости и соответствующие им критические уклоны труб. Эти уклоны для всех труб, кроме расположенных на 55 и 102 км, оказались меньше фактических. Однако слой наносов был обнаружен только в трубе, расположенной на 55 км, а также в шести трубах (табл. 5), где уклоны были больше критических.

По-видимому, решение этой проблемы требует постановки более длительных и тщательных наблюдений с целью введения в расчет ряда дополнительных факторов (неправильное заложение оголовков труб, состояние грунта, задернованность прилегающей местности, наличие осыпей, деформация насыпи железной дороги у сооружения и др.).

Таблица 5

Значения неразмывающих скоростей в трубах

Местоположение пункта наблюдения, км	Толщина заиления, см	Уклон трубы $i_{\phi}$	Критический уклон $i_{кр}$	Неразмывающая скорость $v_n$ , м/с
1	35	0,0094	0,0045	1,90
55	25	0,0039	0,0040	1,93
360	6	0,018	0,0054	1,84
232	5	0,055	0,0066	1,86
Сортировочная	4	0,0047	0,0036	1,95
10	30	0,054	0,0033	1,70
12	20	0,011	0,0082	1,75
102	—	0,00	0,0115	1,63

Кроме того, следует отметить, что рекомендуемые различными ведомствами методики и нормы расчета для связанных грунтов несовершенны и при одинаковых условиях дают различные значения критических скоростей [4, с. 124, табл. 30].

Результаты обследования местных размывов в нижних бьефах сооружений (табл. 6) позволяют оценить рекомендуемую Методическим указанием методику их расчета. Как видно из табл. 6, расчетные значения глубин местного размыва значительно выше фактических. Это может быть частично объяснено мероприятиями, проводившимися соответствующими ремонтными службами, но в основном является результатом несовершенства рекомендуемой методики расчета. По этой методике максимальная глубина размыва определяется по формуле

$$T_{\max} = \eta T_{гр}, \quad (2)$$

где  $\eta$  — относительная глубина размыва;

$$T_{\text{пр}} = \psi D_3 \left( \frac{Q}{Q_k} \right)^{0,6} \left[ \frac{D_3^3}{\left( \frac{L}{D_3} + 1 \right) b b_p d} \right]^{0,2} - \text{предельная глубина размыва.}$$

Здесь  $\psi$  — коэффициент, принимаемый равным единице для укреплений с предохранительным откосом и 0,6 — при отсутствии предохранительного откоса;  $L$  — длина укрепления, отсчитываемая от подошвы насыпи;  $b$  — размер отверстия сооружения;  $b_p$  — ширина сечения для труб в конце оголовка, для мостков и труб с порталными оголовками — в конце конусов;  $d$  — расчетный диаметр частиц грунта;  $D_3$  — эквивалентный диаметр сооружения;  $Q$  — расчетный расход;  $Q_k$  — эталонный расход.

В формуле (2) учет крупности грунта осуществляется как обычно через диаметр его частиц  $d$ , причем для связанного грунта рекомендуется выражение

$$d = 4,5(0,15 + C_p), \quad (3)$$

где  $C_p$  — расчетное сцепление в т/м<sup>2</sup>, которое определяется испытанием грунтов или по справочникам.

При такой методике недоучитывается механический состав грунтов, а для связанных грунтов, априори, предполагается, что они находятся во влагонасыщенном состоянии. Это не всегда применимо для временнодействующих водотоков и может привести к существенным погрешностям.

В частности, особенно большие отклонения расчетных величин от фактических отмечаются в условиях задернованности нижнего бьефа сооружений.

Помимо этого, формула (2) недооценивает условий растекания потока в нижнем бьефе, что оказывает существенное влияние на скорости, а следовательно, и на глубины размыва.

Сравнение и анализ данных о глубинах местных размывов, приведенных в табл. 6 показывает, что для большинства малых водотоков (42 из 49) расчетные величины существенно превышают фактические. Так, на 36 (73%) сооружениях размыв нижнего бьефа практически отсутствовал и только на 13 (27%) — глубина местного размыва достигала 0,06—0,084 м.

При таких допущениях вызывает большое сомнение введение дополнительных усложняющих положений.

Действительно, определение коэффициента  $\eta$  производится по графику  $\eta = f(\tau)$  [1, рис. 40] в зависимости от относительного времени размыва  $\tau$ , равного отношению продолжительности размыва  $t$  к периоду 75% предельного размыва  $t_{0(0,75)}$ . Причем время размыва определяется как 1/4 продолжительности подъема и спада паводка плюс время стояния пика, а время осуществления 75% предельного размыва определяется по сложной формуле, хотя это в конечном итоге не повышает точности расчета.

Таблица 6

## Сравнение расчетных и наблюдаемых глубин размыва за сооружениями

Местоположение пункта наблюдения, км	Расчетный размыв $T_{\max}$ , м	Наблюдаемый размыв $T_n$ , м	$\frac{T_{\max} - T_n}{T_{\max}}$ , %	Примечание
1	0,88	Размыта нет	100	При определении погрешности соотношение бралось к $T_{\max}$ так как $T_n$ в большинстве случаев равно 0.
66	1,01	»	100	
55	2,88	»	100	
87	4,03	»	100	
103	0,15	»	100	
102	0,44	»	100	
117	0,92	»	100	
63	1,26	»	100	
51	0,82	0,30	63	
53	0,69	Размыта нет	100	
94	1,19	»	100	
8	0,74	0,55	27	
112	1,03	Размыта нет	100	
108	0,91	»	100	
9	0,75	0,50	33	
43	0,66	Размыта нет	100	
26	0,51	»	100	
13	1,04	»	100	
7	0,80	0,70	12	
88	0,81	Размыта нет	100	
40	0,87	»	100	
46	0,94	»	—	
60	0,176	0,06	65	
79	0,65	Размыта нет	100	
98	0,79	»	100	
99	0,79	»	100	
108	0,72	»	100	
120	0,405	0,25	38	
121	0,73	0,40	45	
157	0,518	Размыта нет	100	
Заводск				
1	0,53	»	100	
Карпинский				
1	0,50	»	100	
Сортировочная				
1	1,23	»	100	
19	0,9	»	100	
71	1,92	»	100	
72	0,615	»	100	
41	0,72	»	100	
76	2,42	»	100	
360	0,67	0,15	63	
292	0,61	0,20	67,5	
295	0,21	0,11	48	
297	0,21	Размыта нет	100	
98 (Чусовская)	3,25	0,84	74	
11	1,39	Размыта нет	100	
12	1,06	—	100	
1395	0,44	0,20	54,5	
19	нет	Размыта нет	0	

К тому же в формулу (4) для определения времени 75% предельного размыва в случае связанных грунтов входит расчетное спешение  $C_p$ , точность определений которого невелика

$$t_{0, (0,75)} = 0,1 \left( \frac{Q}{Q_k} \right)^{0,25} \left[ \frac{T_{np}^3}{Q} + 11 \left( \frac{C_p}{\gamma} \right)^3 \frac{1}{Q} \right]. \quad (4)$$

Вторым существенным недостатком является недоучет растительности, резко повышающей сопротивление размыва нижнего бьефа. Корневая система сомкнутого растительного покрова закрепляет поверхность грунтов, подвергающихся размыву и, тем самым, повышает ее сопротивляемость разрушающему действию водного потока.

Культурная растительность повышает сопротивляемость размыву в 1,4—2,0 раза, а сорная, обладающая более развитой корневой системой, еще в большей степени [4].

Эти положения необходимо учесть в новой инструкции.

Таким образом, выполненный анализ натуральных и расчетных данных по местному размыву указывает на необходимость упрощения расчетной формулы (2). Учет ряда дополнительных факторов при этом (условия растекания потока, состояние поверхности, вид и степень зарастания растительностью и ряд других) целесообразно проводить с помощью коэффициентов. Значения последующих можно задавать либо в виде простейших формул, либо в виде таблиц. Так, например, более детальный учет растекания потока за сооружением приведен Л. Г. Бегамом и Г. Я. Волченковым [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бегам Л. Г., Волченков Г. Я. Водопропускная способность мостов и труб. М., «Транспорт», 1973. 192 с.
2. Инструкции по расчету стока с малых бассейнов, ВСН 63-67. М., Оргтрансстрой, 1968. 94 с.
3. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72. Л., Гидрометеоиздат, 1972. 20 с.
4. Мирцхулава Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., «Колос», 1967. 180 с.

## ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНОВ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ ПОЙМЕННЫХ РУСЕЛ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РУСЛОВОГО И ПОЙМЕННОГО ПОТОКОВ

«Кинематический эффект» руслового и пойменного потоков [1] проявляется и в натуре, что подтвердили исследования, проведенные экспедициями ГГИ под руководством Д. Е. Скородумова [2]. Суть эффекта в снижении скоростей и расходов воды в русле с выходом потока на пойму и в уменьшении пропускной способности всего русла с поймой. Этот эффект наблюдается как при параллельности осей русла и поймы, так и при их пересечении (под некоторым углом  $\alpha$ ).

Открытие кинематического эффекта заставило гидрологов пересмотреть методику расчета расходов воды при выходе потока на пойму. Если раньше при построении кривых расходов для русловой части потока отмечалось отклонение кривой влево при уровнях выхода воды на пойму, то данные измерений считались некачественными и, как правило, их забраковывали. Теперь это явление получило закономерное объяснение. Пришлось ввести коррективы в методику экстраполяции кривых расходов и нормативы коэффициентов сопротивлений и коэффициентов шероховатости.

Исследования И. П. Спицына [3], С. И. Агасиевой [4], Ле-Ван-Киена [5], Г. В. Железнякова и других, проведенные как в натуральных условиях, так и на моделях русла с поймой (при параллельности геометрических осей руслового и пойменного потоков), дали возможность рассчитывать средние скорости во взаимодействующих отсеках таких потоков. Опыты по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей показали, что и в этом случае наблюдается кинематический эффект, осложненный влиянием угла встречи потоков. Эксперименты позволили сделать оценку влияния этих факторов на скорость в русловом отсеке [7, 8].

К настоящему времени известен ряд методов решений плановой задачи [9, 10 и др.]. В их основе лежит схема, разработанная Н. М. Бернадским с теми или другими модификациями. В последнее время эта схема существенно модернизирована Б. В. Проскуряковым [10].

Методика построения планов течений основана на четырех уравнениях: продольного динамического равновесия (1), попереч-

ного равновесия (2), уравнения неразрывности для струи и потока (3 и 3'), падения отметки уровня на участке (4)

$$i_x = -\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{V^2}{C^2 H} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V^2}{2g} \right); \quad (1)$$

$$i_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{V^2}{gr}; \quad (2)$$

$$dQ = VH dy; \quad (3)$$

$$Q = \int_0^b VH dy; \quad (3')$$

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy, \quad (4)$$

где  $V$  — средняя скорость в поперечном сечении транзитной струи;  $H$  — средняя глубина струи;  $C$  — значение коэффициента Шези;  $r$  — радиус кривизны струи,  $i_x$  и  $i_y$  — соответственно продольный и поперечный уклоны;  $z$  — отметка свободной поверхности;  $x$ ,  $y$  — продольная и поперечная координаты.

Совместное решение уравнений (1), (2), (3) и (4) при  $dz=0$  позволяет получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{V^2/gr}{\frac{V^2}{C^2 H} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}}. \quad (5)$$

Уравнение (5), записанное в конечных разностях, позволяет построить горизонтали свободной поверхности.

Построение плана течений проводится в три этапа.

На первом этапе, имея план русла с поймой, определяем расход воды в каждом створе по уравнению (3'), предполагая, что поперечный уклон  $dz/dy=0$ . Тогда в каждом створе

$$Q = \left( -\frac{\partial z}{\partial x} \right)^{1/2} \int_0^b \frac{H^{3/2}}{n} dy. \quad (6)$$

Если известны все параметры, необходимые для вычисления интеграла (6), то после расчетов поток разбивается на струи пропорционально изменению  $\int_0^b \frac{H^{3/2}}{n} dy$ . Расход в каждой струе равен

$\frac{Q}{m}$ , где  $m$  — число струй.



Эта разбивка потока на струи в каждом створе позволяет определить по плану участка с нанесенными границами струй радиусы кривизны  $r$  линий токов.

На втором этапе, когда известны радиусы кривизны  $r$ , по выражению (5) строятся изолинии равных отметок и в каждой струе находятся расстояния между ними  $l$ . На этом этапе уже учтен поперечный уклон.

На третьем этапе по известным расстояниям между горизонталями можно найти расходы воды в створах из выражения

$$Q = (-\Delta z)^{1/2} \int_0^b \frac{H^{5/3}}{nl^{1/2}} dy, \quad (7)$$

в котором влияние поперечного уклона учтено через переменную  $l$ . На этом этапе разбивку на струи производят уже пропорционально изменению интеграла выражения (7). Линии токов, полученные на этом этапе, и их положение считаются окончательными.

В выражениях (6) и (7) под знаком интеграла находятся коэффициенты шероховатости  $n$ . В расчетах, выполненных Б. В. Проскуряковым [10], при построении планов течений в руслах величина  $n$  принимается постоянной.

К. В. Гришанин указывает: «Если решение ведется с учетом трения, то необходимо знать также распределение по площади дна выступов шероховатости  $\Delta = \Delta(x, y)$ , или коэффициентов шероховатости  $n = n(x, y)$ » [9, с. 243]. Проведенные расчеты по определению коэффициентов шероховатости  $n$  по опытным и натурным данным показали, что для реальных условий его зависимость несколько сложнее, так как  $n = n(x, y, H)$ .

Последнее обстоятельство учитывалось при построении планов течений, поэтому в дальнейших расчетах по методу Б. В. Проскурякова в формуле (7) под знаком интеграла величины  $n$  и  $l$  принимались переменными.

При постоянном  $n$  для потоков с поймой расчетные значения средних скоростей по ширине потока не отражают влияния «кинематического эффекта» на границе перехода от русла к пойме. Особенно большое расхождение между данными теоретических расчетов и опытными получились для экспериментов на моделях с прямоугольными формами русла. При этом подинтегральная функция в формуле (6) является разрывной, так как на границе русла с поймой происходит скачок глубин. Расходы в этом случае необходимо определять по выражению

$$Q = \left(-\frac{\partial z}{\partial x}\right)^{1/2} \left( \int_0^{b_{n,n}} \frac{H_{n,n}^{5/3}}{n_{n,n}} dy + \int_{b_{n,n}}^{b_p} \frac{H_p^{5/3}}{n_p} dy + \int_{b_p}^{b_{n,n}} \frac{H_{n,n}}{n_{n,n}} dy \right). \quad (8)$$

Анализ измеренных скоростей для случая прямоугольного русла с поймой показывает, что они не претерпевают разрыва даже на границе русла с поймой. Если же таковые и имеются, то они лежат за пределами точности измерения расхода воды. Для того чтобы результаты расчетов по методу Б. В. Проскурякова давали результаты, близкие к данным измерений, необходимо отказаться от постоянства  $n$  и перейти к введению под знак интеграла его переменного значения  $n=n(x, y, H)$ . Практически это осуществимо расчетом и построением планов  $n=n(x, y, H)$  (для нескольких наполнений русла с поймой).

Имея такие планы изменений коэффициентов шероховатости, можно выполнить расчет средних скоростей на любой вертикали данного участка, и, следовательно, произвести построение планов течений по методу Б. В. Проскурякова. В этом случае кинематический эффект руслового и пойменного потоков будет учтен переменным значением коэффициента шероховатости. Следует заметить, что коэффициент шероховатости по своей структуре весьма сложен. Он зависит не только от величины выступов шероховатости, но и от режима течения потока — это как бы интегральная характеристика, учитывающая, возможно, и другие факторы.

В гидравлической лаборатории ЛГМИ были поставлены опыты по изучению взаимодействия руслового и пойменного потоков при углах пересечения осей потоков  $\alpha=30, 45, 60$  и  $90^\circ$ . Опыты позволили установить изменения значения коэффициентов шероховатости. Они выявили, что коэффициент шероховатости является функцией плановых координат и глубины потока. Сравнение его величин для различных частей русла с поймой позволяет выделить три зоны. Первая расположена на площади русла и отличается большими значениями коэффициента шероховатости и его резким изменением по длине русла. Так, например, при  $\alpha=30^\circ, H=11,2$  см коэффициент шероховатости по длине русла изменяется от 0,022 до 0,034. Причиной такого изменения является неравномерность движения потока на участке с резким переходом глубин от пойменных к русловым. Для такого участка фактически находится фиктивный коэффициент шероховатости  $n_{\phi}$ , значение которого отличается от истинного коэффициента шероховатости на величину

$\sqrt{1 - \frac{V}{ig} \frac{\partial V}{\partial x}}$  и поэтому

$$n_{\phi} = n \sqrt{1 - \frac{V}{ig} \frac{\partial V}{\partial x}} \quad (9)$$

Это уравнение получено путем сравнения уравнений неравномерного потока с уравнением движения квазиравномерного потока. При переходе от глубин пойменного потока к глубинам русла частная производная  $\partial v/\partial x$  приобретает знак минус, вызывая тем самым возрастание  $n_{\phi}$ .

Вторая зона расположена на пойме выше русла, пересекающего пойму. Она характеризуется более равномерным распределением коэффициента шероховатости  $n$ , чем в предыдущей зоне. Если амплитуда  $\Delta n$  в первой зоне составляет 0,012, то во второй она равна 0,004.

Третья зона расположена также на пойме, но ниже русла ее пересекающего. В этой зоне на распределение коэффициента шероховатости решающее влияние оказывает русловой поток, поступающий на пойму из вышележащей зоны с большими скоростями (в сравнении со второй зоной) и растекающийся по ней. Это увеличение скорости как бы эквивалентно дополнительному уклону, который в расчетной схеме не учитывается, но вызывает значительное снижение коэффициента шероховатости.

Таким образом, можно констатировать, что все особенности в распределении коэффициентов шероховатости вызваны в основном неравномерностью движения как во всем потоке в целом, так и в выделенных выше зонах. К этому следует добавить, что с ростом наполнения поймы разница значений  $n$  по длине и ширине потока между зонами снижается. Она будет тем меньше, чем больше отношение глубин поймы и русла.

Интересно заметить, что для естественных русел на ряде вертикалей наблюдается не только уменьшение коэффициентов шероховатости с ростом глубин, но и увеличение их, в то время как для всего створа  $n$  только уменьшается. Для лабораторных русел этого не наблюдается.

Выполненный расчет планов течений по методу Б. В. Проскурякова для русел с поймой при их пересечении под углами 30, 45 и 60° показал, что при наличии планов изолиний коэффициентов шероховатости можно получить весьма хорошую сходимость расчетных и натуральных данных.

Построение планов течений изложенным выше способом было выполнено и для естественного русла с поймой. За объект расчета был взят участок р. Луги у Толмачева. Для выполнения расчетов использованы материалы экспедиции ГГИ 1963 г.

По данным натуральных измерений скоростей и уклонов и при условии, что на участке было квазиравномерное движение, подсчитаны для каждой вертикали коэффициенты шероховатости. Это позволило построить графики изменения коэффициентов шероховатости с глубиной, а затем для четырех наполнений получить планы  $n = n(x, y, H)$ . Для этих же наполнений были построены планы течений. На рис. 1 представлен план изолиний коэффициента шероховатости, а на рис. 2 — план натуральных и расчетных течений.

Наибольшее отклонение расчетных данных от натуральных отмечено на шестом створе, что приводит к погрешностям в определении расхода воды до 10—12%. Это расхождение объясняется не только погрешностями в расчетах, но и особенностями строения участка (остров, мыс, вдающийся в поток) и гидрографической сети (наличие притоков).

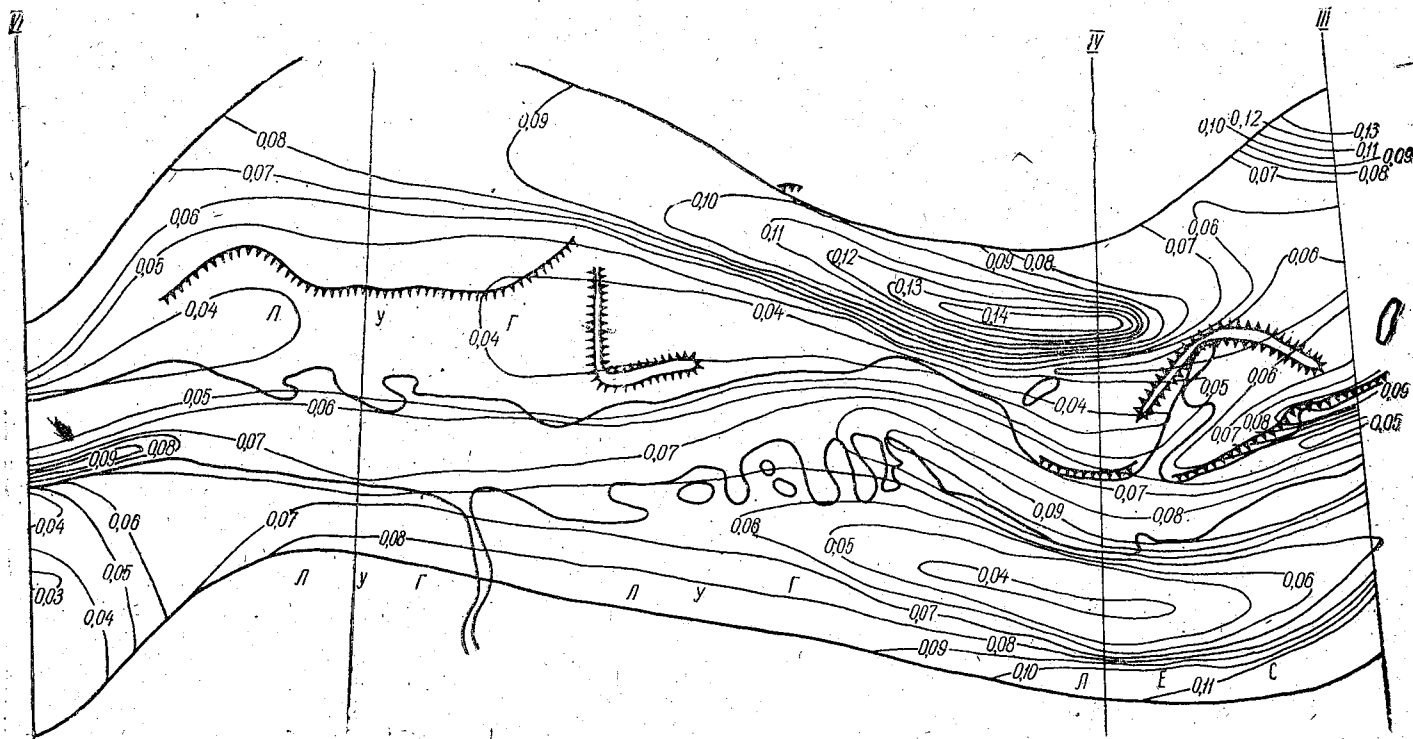


Рис. 1. План изолиний коэффициента шероховатости участка р. Луги п. Толмачево, наполнение Н-7 м.

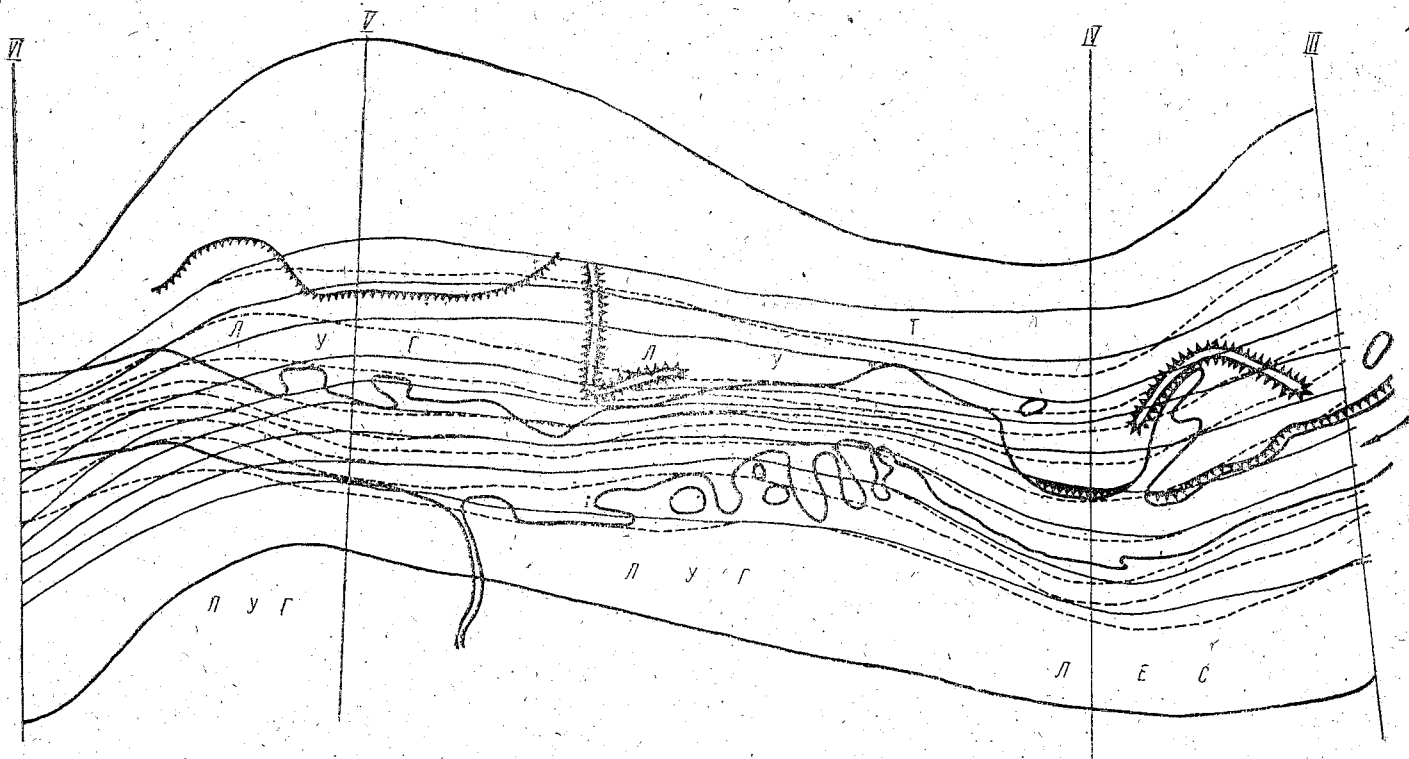


Рис. 2. Натурный план течений и расчетный, полученный по методу Б. В. Проскурякова на участке р. Луги, п. Толмачево, наполнение  $H=7$  м:

----- натурные линии токов, ————— расчетные линии токов

В заключение можно сделать выводы.

1. Метод построения планов течений, разработанный Б. В. Проскуряковым, вполне применим для случая взаимодействия руслового и пойменного потоков при наличии планов изолиний коэффициентов шероховатости.

2. Данными исследованиями показано, что параметр  $n$ , являющийся интегральной характеристикой сопротивления, существенно изменяется как по ширине и длине потока, так и при изменении уровня воды —  $n = n(x, y, H)$ .

3. Выполненная работа показывает, что гидрологическим станциям необходимо изучать гидравлические характеристики не только отдельных створов, но и характерных участков, используя для этого возможности аэрогидрометрии.

4. Назрела необходимость типизации русел с точки зрения их гидравлики сопротивлений и увязки ее типизацией русловых процессов, так как в развитии потоков активной частью является не ложе потока, а сам поток. Такого рода типизация дополнила бы современные пути изучения пойменных массивов, развиваемые ГГИ

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железняков Г. В. Гидравлическое обоснование методов речной гидрометрии. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1950. 164 с.
2. Скоробудов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами экстраполяции кривых расходов воды. — «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—97.
3. Спицын И. П. Взаимодействие потоков основного русла и поймы при условии параллельности их осей. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук Л., 1963. 25 с. (ЛГМИ).
4. Агасиева С. И., Барекян А. Ш. Изменение средних скоростей главного русла и коэффициента Шези при прохождении паводка. — «Метеорология и гидрология», 1961, № 9, с. 36—39.
5. Соколов Ю. Н. Кинематический эффект в деформируемых руслах с поймой. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1967. 25 с. (МИИТ).
6. Ле-Ван-Киен. Движение воды в открытых руслах составного поперечного профиля. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени. канд. техн. наук. М., 1968. 24 с. (МГМИ).
7. Барышников Н. Б., Иванов Г. В. Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков при пересечении их осей на русловые процессы. — В кн.: Водный транспорт леса. Межвузовский сб., вып. 2, Красноярск, 1974, с. 119—126.
8. Караушев А. В. Речная гидравлика. Л., Гидрометеиздат, 1969. 416 с.
9. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1969. 428 с.
10. Проскуряков Б. В. Расчет скоростного поля планового течения руслового потока. — «Труды ГГИ», 1972, вып. 192, с. 66—72.

## К ВОПРОСУ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ КРИВОЙ РАСХОДОВ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ОТКРЫТОГО ПОТОКА

В последнее время предлагаются различные способы экстраполяции кривой расходов, в том числе и при неустановившемся режиме движения [1]. Рассмотрим возможность использования для указанной цели уравнений одномерной гидравлической идеализации записанной в следующей форме [2]:

$$i - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{gF} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gF^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{Q^2}{K^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $i$  — уклон дна;  $h$  — глубина;  $Q$  — расход воды;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $F$  — площадь живого сечения;  $K$  — пропускная способность;  $x$ ,  $t$  — соответственно продольная координата и время.

Линеаризуем уравнение (1) по расходу, для чего примем  $Q = Q_0 + q$  (здесь  $Q_0$  — исходное значение расхода;  $q$  — приращение расхода) и учтем, что из уравнения (2)  $\frac{\partial Q}{\partial x} = -\frac{\partial F}{\partial t}$ , тогда, пренебрегая величиной  $q^2$ , получим

$$i - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{Q_0^2}{K^2} + \frac{2Q_0 q}{K^2} + \frac{1}{gF} \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{2Q_0}{gF^2} \cdot \frac{\partial F}{\partial t} - \frac{2q}{gF^2} \frac{\partial F}{\partial t}. \quad (3)$$

Принимая выражение пропускной способности в виде  $K = CF\sqrt{R}$ , коэффициент Шези по формуле Павловского  $C = \frac{1}{n} R^\nu$  (здесь

$R$  — гидравлический радиус;  $n$  — коэффициент шероховатости), и, считая  $R \approx h$ , перепишем формулу (3) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 i - \frac{\partial h}{\partial x} = & \frac{Q_0^2 n^2}{h^{(2y+1)} \left[ \int_0^h B(x, z) dz \right]^2} + \frac{2Q_0 q n}{h^{(2y+1)} \left[ \int_0^h B(x, z) dz \right]^2} + \\
 & + \frac{1}{g \int_0^h B(x, z) dz} \frac{\partial q}{\partial t} - \frac{2Q_c}{g \left[ \int_0^h B(x, z) dz \right]^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B(x, z) dz - \\
 & - \frac{2q}{g \left[ \int_0^h B(x, z) dz \right]^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B(x, z) dz, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где  $B$  — ширина русла;  $z$  — переменная интегрирования.

Рассмотрим прохождение паводочной волны через гидроствор с координатой  $x = x_0$ . Считаем, что на данном гидростворе производятся наблюдения за уровнем  $H|_{x_0} = f_1(t)$  и уклоном свободной поверхности  $\left( i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{x_0} = f_2(t)$ , а также имеются данные о величине  $Q_0$  в начальный момент времени  $t_0$ . С учетом вышеизложенного, уравнение (4) можно рассматривать как неоднородное линейное дифференциальное уравнение в полных производных

$$\frac{dq}{dt} + L(x_0, t) q = S(x_0, t), \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}
 L(x_0, t) = & \frac{2gQ_0n^2}{h^{(2y+1)} \int_0^h B(x_0, z) dz} - \frac{2 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B(x_0, z) dz}{\int_0^h B(x_0, z) dz} = L(x_0, t); \\
 S(x_0, t) = & \left( i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{x_0} \frac{g \int_0^h B(x_0, z) dz}{\int_0^h B(x_0, z) dz} + \frac{2Q_0 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B(x_0, z) dz}{\int_0^h B(x_0, z) dz} - \\
 & - \frac{gQ_0n}{h^{(2y+1)} \int_0^h B(x_0, z) dz} = S(x_0, t).
 \end{aligned}$$



Для целей экстраполяции уравнение (5) можно использовать при условии, что  $L(x_0, t)$  и  $S(x_0, t)$  являются известными непрерывными функциями в интервале экстраполяции. При начальном условии  $q=q_0$  для  $t=t_0$  решение уравнения (5) будет

$$q = e^{-\int_{t_0}^t L(x_0, t) dt} \left( \int_{t_0}^t S(x_0, t) e^{\int_{t_0}^t L(x_0, t) dt} dt + q_0 \right). \quad (6)$$

Заметим, что значение  $Q_0$  можно получить по кривой  $Q=f(H)$  при условии устойчивой связи  $Q$  и  $H$  для момента  $t_0$ . Если ниже или выше расчетного створа находится ГЭС или гидроствор, на котором ведутся постоянные наблюдения за расходом (или на этом гидростворе существует устойчивая связь  $Q=f(H)$ ), то в первом приближении для определения величины  $Q_0$  можно воспользоваться уравнением неразрывности [2]. Действительно, интегрируя уравнение (2) на участке от гидроствора (с устойчивой зависимостью  $Q=f(H)$  или ГЭС) с координатой  $x=x'$  до расчетного створа, получим

$$Q(x_0, t) = Q(x', t) - \int_{x_0}^{x'} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_0^h B(x, z) dz \right] dx. \quad (7)$$

Определив по формуле (6)  $q(t)$ , можно уточнить новое значение  $Q_0$  для момента  $t$  по выражению (7) (либо по уравнению  $Q_0(t) = Q_0(t_0) + q$ ) и затем произвести новую экстраполяцию.

Если принять  $L(x_0, t) \equiv L(x_0)$ ,  $S(x_0, t) \equiv S(x_0)$ , то при нулевом начальном условии решение уравнения (5) будет иметь вид

$$q = \frac{S(x_0)}{L(x_0)} (1 - e^{-L(x_0)t}). \quad (8)$$

Проведем расчет по выражениям (7), (8) для гидроствора, расположенного на р. Тверце на расстоянии 950 м от створа ГЭС [3]. Примем за исходный момент 6 ч. 5 августа 1961 г. При этом

$$q_0 = 0; H_0 = 36,36 \text{ м усл.}; Q_0 = 21,7 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; F \Big|_{t_0}^{x_0} = 36,1 \text{ м}^2;$$

$$\left( i - \frac{\partial h}{\partial x} \right) \Big|_{t_0}^{x_0} = 0,21 \text{ ‰}; K \Big|_{t_0}^{x_0} = 1485 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; \frac{\partial F}{\partial t} \Big|_{t_0}^{x_0} = 0,0037 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Для этих условий получим, что  $L(x_0) = 4,89 \cdot 10^{-4} \frac{1}{c}$ ;  $S(x_0) = 44,4 \cdot 10^{-4} \frac{M^3}{c^2}$ . Подставляя найденные значения в формулу (8) для  $t = 5$  мин имеем  $q = 1,3 \frac{M^3}{c}$ .

Таким образом, для величины  $Q$  получается значение  $23 \text{ м}^3/\text{с}$ , что практически совпадает с величиной расхода, измеренного методом скорость — площадь. При значительных интервалах экстраполяции получается большое расхождение между значениями измеренных расходов и расходов, подсчитанных по уравнению (8). В этом случае желательно использовать уравнение с переменными коэффициентами (5). Это же замечание относится и к руслам,

в которых измеряемые функции, например  $\int_0^h B(x_0, z) dz$ , не являются монотонными; в частности русло с поймой. Вообще, вопрос о применимости рассматриваемого способа к руслам с поймой требует специального тщательного рассмотрения.

Известно [4—8], что при выходе воды на пойму наблюдается существенное изменение скоростной структуры руслового потока, обусловленное влиянием на него пойменного. В настоящее время физические основы этого процесса вскрыты в исследованиях В. Н. Гончарова [4], Г. В. Железнякова [5] и др. [6]. Предлагается учитывать дополнительное сопротивление движению руслового потока за счет пойменного введением дополнительного члена  $i_{вз}$  в правую часть уравнения (1) [1]. Помимо этого, в ряде работ [7, 8] пойма рассматривается как фактор, увеличивающий трансформацию паводочной волны за счет аккумуляции объема воды на подъеме и последующей частичной отдачи ее на спаде паводка. Следовательно, при экстраполяции кривой расходов выше уровня затопления поймы необходимо учитывать это явление, названное Г. В. Железным «кинематическим эффектом» [5].

Таким образом, в данной работе рассмотрена возможность использования линеаризованного динамического уравнения движения, справедливого для фиксированного гидроствора для экстраполяции кривой расходов в беспойменном русле. Необходимы дальнейшие исследования по учету влияния поймы, с целью разработки методики экстраполяции кривых расходов для пойменных русел.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. — «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—97.
2. Картвелишвили Н. А. Неустановившиеся открытые потоки. Л., Гидрометеоздат, 1968. 126 с.

3. Исследования неустановившегося движения воды на реках Тверце и Ордеже. Под ред. Н. Е. Кондратьева и В. А. Урываева. Л., Гидрометеоздат, 1961. 288 с.
4. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеоздат, 1962. 374 с.
5. Железняков Г. В. Теория гидрометрии. Л., Гидрометеоздат, 1976. 344 с.
6. Varishnikov N. B., Jvanov G. V., Sokolov Yu. N. Role of Flood Plain in Flood Discharge of River Channel. Proceed. XIV Congress of the IAHR, vol. 5, Paris, 1971, p. 141—148.
7. Грушевский М. С. Волны попусков и паводков в реках. Л., Гидрометеоздат, 1969. 336 с.
8. Федосеев В. А. Одномерная модель при расчетах неустановившегося движения воды в реках со сложной поймой. — «Труды ГГИ», 1968, вып. 161, с. 76—91.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ВХОД В РУКАВА ПРИ БИФУРКАЦИИ РУСЕЛ

Изучением вопросов движения потока при его делении на рукава занимаются давно. Наибольшую известность получили опыты Х. Булле [1], А. Я. Миловича [2], В. А. Шаумяна [3], А. И. Лосиевского [4], В. С. Перехвальского [5], А. С. Офицера [6] и др. Итоги этих опытов позволили вскрыть ряд закономерностей поведения потока в районе его разветвления, в частности влияние резко выраженного изгиба потока в отводящий рукав.

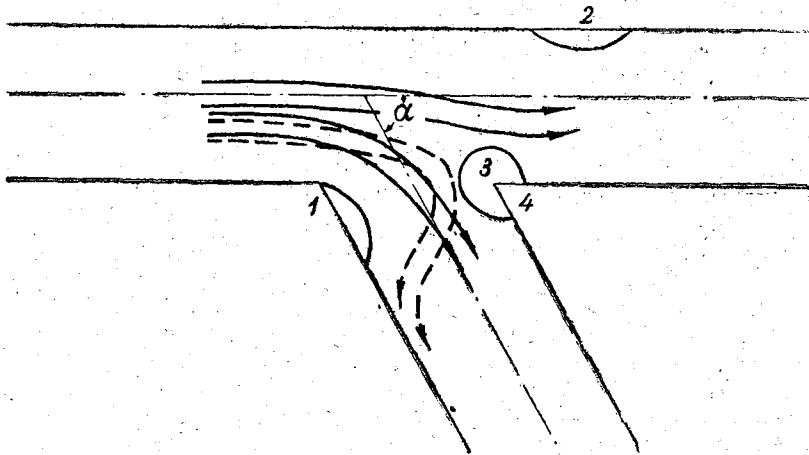


Рис. 1. План-схема деления потока на рукава:

1 — водоворотная зона бокового рукава; 2 — водоворотная зона главного русла; 3 — зона подпора; 4 — стрелка острова;  $\rightarrow$  — поверхностные струи;  $- - \rightarrow$  — донные струи

Верхние слои, обладающие большими скоростями, меньше подвержены влиянию изгиба потока в отводящее русло (рис. 1), чем придонные, движущиеся с меньшими скоростями. При изгибе потока происходит перестройка его скоростного поля. Под воздействием изгиба, кроме продольного перемещения масс жидкости, наблюдается их вращение в поперечном направлении, вызванное центробежными и центростремительными усилиями. Поток при изгибе приобретает винтообразную форму движения.

При входе в отвод (см. рис. 1) поверхностные слои, сохраняя первоначальное направление движения, отжимаются от верхнего берега отвода. Если условия входа в отвод таковы, что донные струи, так же и поверхностные, резко отходят от его верхнего ребра, то ниже в отводе возникает водоворотная зона — 1. Этот процесс в деформируемых руслах вызывает интенсивный размыв дна и берега у низовой части входа в отводящее русло — 4 и образование отмели у верховой его части. Механизм образования водоворотной зоны и ее размеры в плане (см. рис. 1) обусловлены величиной угла  $\alpha$  ответвления рукава, конфигурацией его берега, а также относительной величиной расхода воды, поступающей в рукав.

У стрелки острова происходит образование зоны подпора — «водяного бугра» — 3. Обтекая стрелку острова, струи разделяющегося потока искривляются, а скорость воды в струях у стрелки замедляется и их кинетическая энергия частично переходит в потенциальную, что вызывает подъем уровня воды. Скоростное поле в зоне подпора характеризуется наличием циркуляционных течений с вертикальной и горизонтальной осями. Здесь вследствие торможения потока откладываются наносы в виде выдвинутой навстречу потоку небольшой отмели, имеющей вид вытянутого треугольника. Набегающие на низовой берег поверхностные струи частично опускаются вниз, а частично расходятся в стороны от точки деления. Лабораторные исследования и натурные наблюдения, показывают, что движение воды неустойчиво и время от времени происходит смещение точки деления потока то в сторону главного русла, то в сторону рукавов.

Изгиб потока, обратные течения в районе деления потока, вихревые образования и циркуляционные течения вызывают потери напора, которые в дальнейшем будем называть потерями на вход в рукав.

Исследования, выполненные указанными выше авторами, были поставлены главным образом в целях изучения возможности отвода вод из рек и каналов для водоснабжения различных объектов народного хозяйства. Изучением сопротивлений на вход в рукав они не занимались. Потребность же в методике расчета этих сопротивлений появилась в связи с постановкой задачи расчета распределения расходов по рукавам в дельтах сибирских рек при установившемся и не установившемся движении воды.

В гидравлической лаборатории ЛГМИ в 1973—1974 гг. были поставлены опыты в целях изучения сопротивления на вход в рукава в районе бифуркации потока\*. Выбору модели предшествовали гидравлические расчеты русел, позволившие установить основные параметры моделей. Движение потока на модели было плавноизменяющимся. Водоворотные зоны отсутствовали, в этом

\* В проведении и обработке экспериментов принимали участие инженер Е. К. Георгиевская и ряд студентов старших курсов.

случае поток, движущийся в открытом русле, находится в основном под воздействием сил тяжести и центробежной [7]. Поэтому определяющими критериями моделирования являются числа Фруда и Рейнольдса. Первый критерий позволяет установить связь между масштабами скоростей и глубин; второй — определить число Рейнольдса, при котором на модели обеспечивается турбулентный режим движения.

Основные параметры моделей трех серий опытов 1974 г., учитывающие эти критерии, представлены на рис. 2. Уклон дна модели составлял 2,4‰. Опыты 1973 г. носили в основном методический характер и были использованы для корректировки расчетов параметров модели; в данной статье они не приводятся.

Модели, изготовленные из песка и покрытые цементной штукатуркой толщиной 3 см, строились в русловом лотке длиной 11 м и шириной 2,5 м. Параметры моделей позволили, кроме установления потерь напора и сопротивлений, рассмотреть их зависимость от относительной ширины рукавов  $B_p/B_0$  (в экспериментах это отношение изменялось от 0,4 до 0,7), где  $B_0$  — ширина основного русла  $B_p$  — ширина русла в рукавах.

В процессе экспериментов измерялись уклоны свободной поверхности; скорости течения — трубкой Пито-Ребока в трех створах, имевших по пять вертикалей; глубины — игольчатой рейкой с точностью до 0,1 мм и расходы воды — по водосливу. Местная скорость определялась через интервал в один сантиметр глубины, поэтому средняя скорость на вертикали находилась по выражению

$$V_{cp} = \frac{1}{H} \int_0^H V dH,$$

где  $H$  — глубина и  $v_{cp}$  — средняя скорость на вертикали. Для малых глубин расходы и средние скорости рассчитывались по формуле

$$v_{cp} = 0,25 (V_{0,2H} + 2V_{0,6H} + V_{0,8H}).$$

В результате первичной обработки экспериментальных материалов получены данные о расходах, скоростях течения, глубинах в основном русле и рукавах при различных наполнениях и построены графики зависимости этих характеристик от наполнения русла. В качестве примера на рис. 3 приведены кривые зависимости  $Q=f(H)$  для основного русла и рукавов.

Между глубинами в рукавах и в основном русле получена корреляционная связь вида

$$H_p = kH_0,$$

где  $H_p$  и  $H_0$  — глубина соответственно в рукаве и русле;  $k$  — коэффициент пропорциональности; значение которого для различных условий изменяется от 0,88 до 1,0.

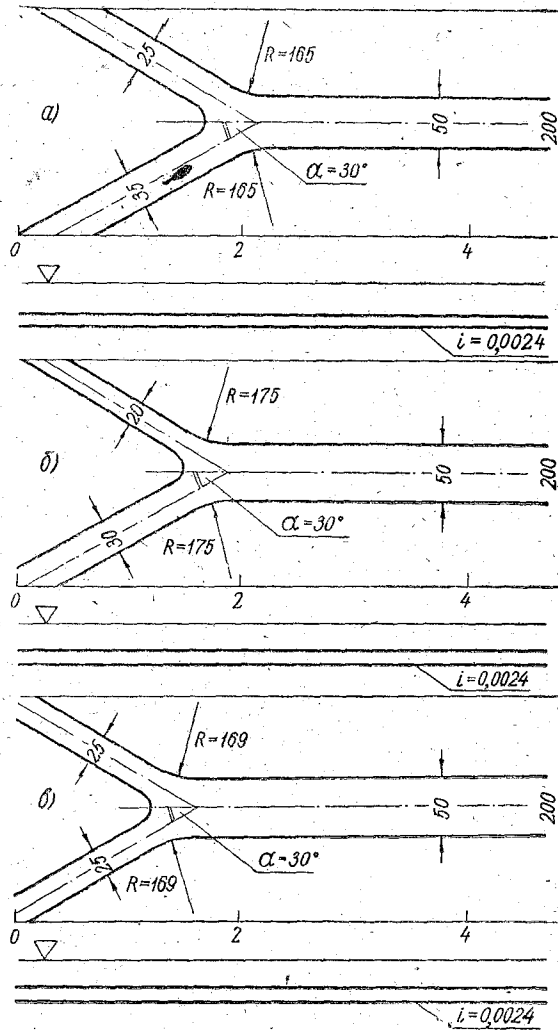


Рис. 2. Планы моделей трех серий опытов 1974 г.:  
 а — план модели I серии опытов; б — план модели II серии опытов; в — план модели III серии опытов

Коэффициенты корреляции для данных зависимостей (для различных рукавов) колеблются от 0,94 до 0,98.

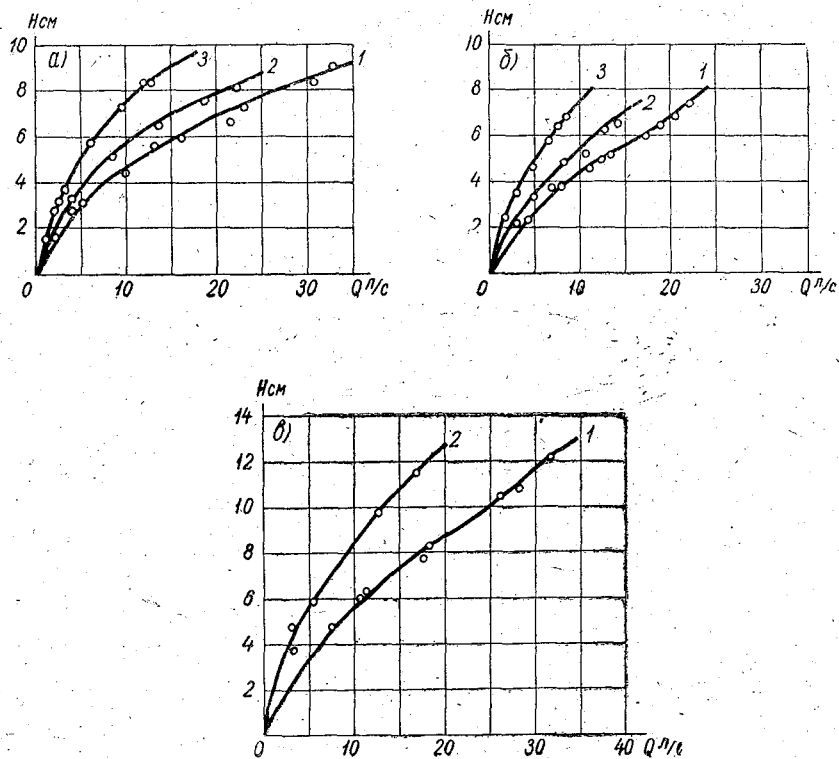


Рис. 3. Кривые расходов для основного русла и рукавов для трех серий опытов:

*a* — I серия опытов; *б* — II серия опытов; *в* — III серия опытов; 1 — основное русло; 2 — левый рукав; 3 — правый рукав

На основе опытных данных также установлены корреляционные зависимости вида:

$$\omega_1 + \omega_2 = \alpha_0 \omega_0; \quad \omega_1 = \alpha_1 \omega_0; \quad \omega_2 = \alpha_2 \omega_0; \quad \omega_0 = \alpha (\omega_1 + \omega_2), \quad (1)$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — соответственно площади сечения основного русла и рукавов;  $\alpha_i$  — коэффициенты пропорциональности, между которыми должны быть зависимости:

$$\alpha_0 = \alpha_1 + \alpha_2 \text{ и } \alpha = \frac{1}{\alpha_0}.$$

По натурным данным установлено, что для дельт сибирских рек  $\alpha = 0,99$ , но в линейной связи вида (1) имеется свободный член,



значение которого зависит от морфометрии составляющих узла разветвления и ряда других факторов.

Потери напора воды на вход в рукава  $h_{вх}$  определялись расчетом по выражению:

$$h_{вх} = H_0 + \frac{v_0^2}{2g} - H_p - \frac{v_p^2}{2g},$$

где  $\frac{v_0^2}{2g}$  — скоростной напор в основном русле;  
 $\frac{v_p^2}{2g}$  — скоростной напор в рукаве.

Коэффициент местного сопротивления на вход в рукава  $\xi$  вычислялся по выражению

$$h_{вх} = \xi \frac{v_p^2}{2g}. \quad (2)$$

В таблице представлены значения всех коэффициентов для трех серий опытов. Графический вид связи (2) был линейного вида, но прямая не всегда проходила через начало координат, поэтому пришлось принять более общий вид зависимости (2)

$$h_{вх} = \xi \frac{v_p^2}{2g} + a. \quad (3)$$

В первой серии опытов для левого рукава экспериментальные точки не легли на прямую типа (3). Для него было получено свое уравнение для расчета потерь напора воды

$$h_{вх} = 0,87 \lg \frac{v_p^2}{2g} + 0,87.$$

Значения параметров формул (3) и (4) по данным экспериментов

Серия опытов	Рукав	$B_p/B_0$	$K$	$a_i$	$\alpha$	$\xi$	$a$	$B_p$ , м
I	правый	0,5	0,967	0,481	0,913	0,64	0,000	0,25
	левый	0,7	0,877	0,614		—	—	0,35
II	правый	0,4	1,0	0,4	1,077	0,077	0,048	0,20
	левый	0,6	0,88	0,528		0,124	0,045	0,30
III	правый	0,5	0,956	0,478	1,038	0,266	0,000	0,25
	левый	0,5	0,956	0,478		0,266	0,000	0,25

Анализ исходных данных показал, что коэффициент сопротивления на вход в рукава не зависит от их относительной ширины. В то же время значение  $k$  может определяться по зависимости

$$k = 1,19 - 0,475 \frac{B_p}{B_0} \quad (4)$$

В заключение следует отметить, что данная работа в известной мере является пионерной. Проведенные эксперименты вскрыли физическую картину процесса деления потока на рукава и позволили дать качественную характеристику кинематической структуры потока в зоне его деления на рукава.

Выполненный анализ имеющихся аналитических разработок ряда авторов позволил рекомендовать в качестве расчетного для определения местных потерь в зоне деления потока на рукава весьма простое выражение линейного типа

$$h_{\text{вх}} = \xi \frac{v_p^2}{2g} + a.$$

Работа носила постановочный характер, поэтому полученные значения коэффициента сопротивления  $\xi$  являются ориентировочными и нуждаются в уточнении на значительно большем по объему экспериментальном материале.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bulle H. Untersuchung über die Geschiebeabteilung bei der Spaltung von Vasserläufer. Berlin, 1926. 72 с.
2. Милович А. Я. Теория деления и соединения потоков жидкости. Л.-М., Речиздат, 1947. 96 с.
3. Шаумян В. А. Научные основы орошения и оросительных сооружений. М., Сельхозгиз, 1948. 759 с.
4. Лоси евский А. И. Лабораторные исследования процессов формирования речного русла в условиях раздвоения потока. — В кн.: Речная гидравлика и гидротехника. М., 1952, с. 85—123. (Центральный научно-исследовательский институт речного флота).
5. Перхвальский В. С. Деление потока при раздвоении русла. — «Труды Академии речного транспорта», 1952, вып. 2, с. 214—223.
6. Офицеров А. С. Вопросы гидравлики водозабора. М., Госстройиздат, 1952. 236 с.
7. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л., «Энергия», 1967. 236 с.

## О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ ПЛОСКОГО СТАЦИОНАРНОГО ПОТОКА В АЛЛЮВИАЛЬНОМ РУСЛЕ

Мнения исследователей, изучающих гидравлические сопротивления в открытых руслах [1, 2, 3 и другие], неоднозначны, иногда противоречивы [11]. В этой статье предлагается еще одно приближенное решение этой сложной задачи.

Рассмотрим плоский поток воды со свободной поверхностью, имеющей уклон. Используем уравнения Эйлера — Стокса, включающие локальную и конвективную силы инерции, силы давления, тяжести и вязкости, отнесенные к единице массы. Считаем, что применительно к турбулентному режиму, соответствующему течениям в аллювиальных руслах, в указанных уравнениях физические и механические свойства жидкости не меняются, сплошность движения не нарушается, на жидкость действует та же система сил. С учетом этих условий и допущения, что между актуальными компонентами скоростей и осредненными во времени существует пропорциональность, применим указанные уравнения для турбулентного потока реальной жидкости, заменяя кинематический коэффициент вязкости  $\nu$  через отношение  $A/\rho$  — коэффициента турбулентного обмена к плотности воды. Для условий стационарного плоского турбулентного потока полагаем

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0; \quad \nabla^2 v_x = \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}, \\ \text{здесь } \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}; \quad v_y = v_z = 0; \quad v_x = f(y); \\ v_x \cdot \frac{\partial v_x}{\partial x} \sim v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \sim v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \ll G_i; \\ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \sim \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \ll \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Примем дно русла за начало координат и используем постоянное по вертикали среднее значение коэффициента турбулентного

обмена  $A$ . Для вычисления  $A$  предложен ряд формул: Буссинеска, Прандтля, М. А. Великанова, В. М. Маккавеева, А. В. Караушева и др. Например, по утверждению М. А. Великанова [4], отношение виртуальной вязкости к физической пропорционально для всего потока числу Рейнольдса, т. е. коэффициент турбулентного обмена

$$A = \mu \cdot \varphi \cdot \frac{v_{\text{ср}} \cdot H}{\nu}, \quad (2)$$

где  $\nu$ ,  $\mu$  — соответственно кинематический и динамический коэффициенты вязкости воды;  $\varphi$  — безразмерный коэффициент, зависящий от формы потока;  $v_{\text{ср}}$ ,  $H$  — соответственно средняя скорость и глубина потока.

Для указанных условий применительно к силам, отнесенным к единице массы, получим

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} = - \frac{\Delta H_* \cdot g}{A \cdot L}, \quad (3)$$

где по Кудряшову

$$A = \mu \cdot \frac{V \overline{d_{\text{дн}}}}{I \cdot \sqrt{a}}, \quad (4)$$

$d_{\text{дн}}$  — средняя крупность частиц донных наносов;  $\Delta H_*$  — перепад гидродинамического напора на длине  $L$  участка русла;  $\frac{\Delta H_*}{L} = I$  — гидравлический уклон;  $\frac{V \overline{d_{\text{дн}}}}{I \cdot \sqrt{a}}$  — число Лохтина;  $a = 1$  — коэффициент с линейной размерностью, пропорциональный удельной кинетической энергии вертикальных составляющих  $\frac{v_{\text{верт}}^2}{2 \cdot g}$  пульсационных скоростей в потоке;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Правомерность использования выражения (4) оправдывается как количественно, так и физически, при этом, во-первых, рядом исследователей [3, 5 — 8] доказано влияние вязкости воды на перемещение донных наносов (рис. 1), во-вторых — 150 измерений в спонтанно сформированных аллювиальных руслах, в лабораторных лотках при небольшом значении отношения глубины потока к его ширине подтверждают зависимость (4а) (для малой мутности воды 50—100 г/м<sup>3</sup>)

$$\frac{r}{q} = \frac{39,6}{\left( \frac{V \overline{d_{\text{дн}}}}{I} \right)^2}, \quad (4а)$$

где  $q$  и  $r$  — элементарные весовые расходы соответственно воды и донных наносов, г/см в с; 39,6 — размерный коэффициент, см.

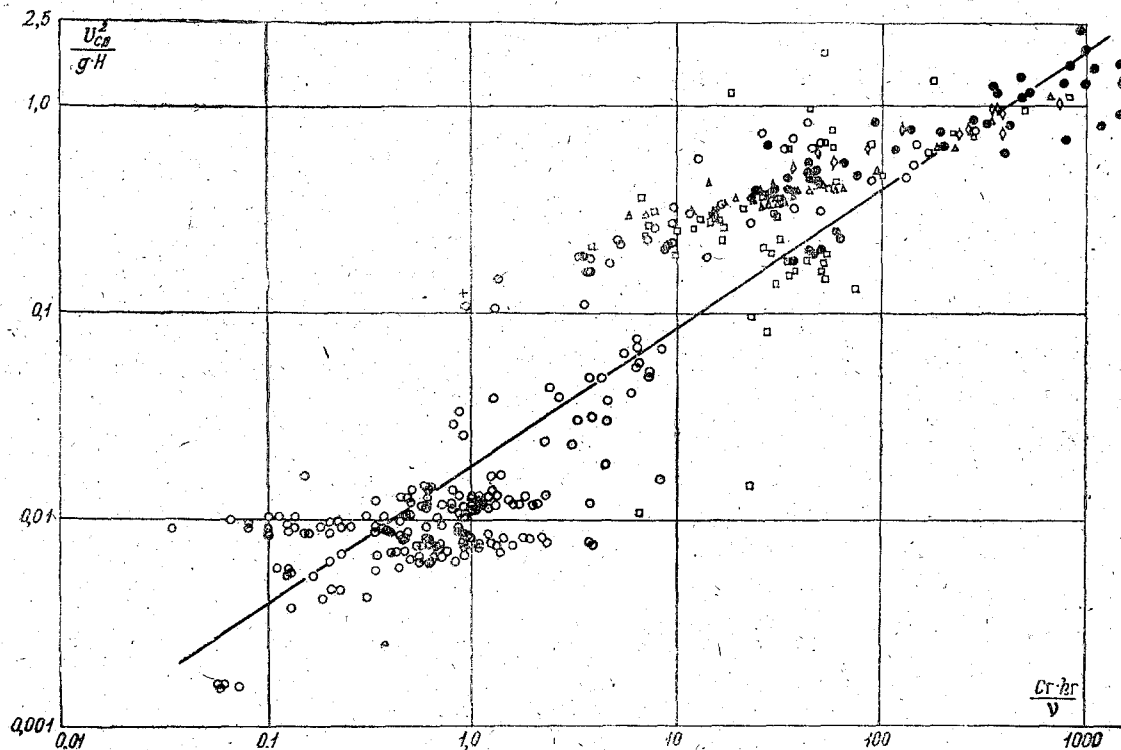


Рис. 1. Зависимость числа Рейнольдса от числа Фруда для донно-грядового перемещения наносов при малой мутности потока по натурным и лабораторным данным:  $C_r, h_r$  — соответственно скорость перемещения и высота гряды. Средняя крупность донных наносов см. на рис. 2.

В формуле (4 а) число Лохтина предложено для средней крупности донных наносов в пределах  $d_{\text{дн}}=0,01-0,5$  см при условии, что донная скорость  $v_{\text{д}} \sim \sqrt{d_{\text{дн}}}$ , т. е. по закону Эри, когда расход донных наносов на данной ширине русла  $R$  г/с, можно выразить зависимостью  $R \sim v_{\text{д}}^5 g \sim v_{\text{ср}}^5 g \sim \frac{d_{\text{дн}}^3 \gamma_{\text{дн}}}{t}$ , что соответствует пятой степени средней скорости в формуле (4а).  
Здесь  $\gamma_{\text{дн}}$  — объемный вес донных наносов;  $t$  — время, с. Интегрируя (3) по  $y$ ; будем иметь

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{\Delta H_* g}{AL} y + C_1; \quad (5)$$

$$v_x = -\frac{\Delta H_* g y^2}{A \cdot L \cdot 2} + C_1 y + C_2, \quad (6)$$

Постоянные  $C_1$  и  $C_2$  определяются из условий: при  $y=0$   $v_x=C_2 \neq 0$ , но мала и ею пренебрегаем, при  $y=H$

$$v_{\text{max}} = C_1 H - \frac{\Delta H_* g}{AL} \cdot \frac{H^2}{2}, \quad (7)$$

где  $H$  — средняя глубина потока;  $v_{\text{max}}$  — наибольшая скорость потока на его поверхности.

Откуда

$$C_1 = \frac{v_{\text{max}}}{H} + \frac{\Delta H_* g H}{AL \cdot 2}. \quad (8)$$

Таким образом

$$v_x = v_{\text{max}} \frac{y}{H} - \frac{\Delta H_* g H^2}{2AL} \cdot \frac{y}{H} \left( \frac{y}{H} - 1 \right). \quad (9)$$

Для выражения средней скорости потока на вертикали  $v_{\text{ср}}$  через  $v_{\text{max}}$  воспользуемся теоретическим решением А. С. Образовского [9]

$$v_{\text{max}} = (1+K) v_{\text{ср}}, \quad (10)$$

где применительно к рассматриваемым условиям величина  $K$  постоянна и среднее значение  $K=0,18$ . Следует заметить, что, по данным многочисленных измерений плавно изменяющегося потока с малой мутностью ( $50-100$  г/м<sup>3</sup>) в открытом русле [10, 12 и др.], значение коэффициента  $K=0,10 \div 0,25$ .

Далее А. С. Образовский [9] предлагает для расчета  $K$  выражение

$$K \approx \frac{\sqrt{g}}{\chi C_{\text{ш}}} \quad (11)$$

где  $C_{\text{ш}}$  — скоростной множитель в формуле Шези;  $\chi$  — постоянная Кармана ( $\chi \approx 0,36 - 0,44$ ). Обозначим  $\frac{y}{H} = \bar{y}$ , при этом  $0 < \bar{y} \leq 1$ .

Средняя скорость на вертикали

$$v_{\text{ср}} = \int_0^1 v_x d\bar{y} \quad (12)$$

Отсюда

$$v_{\text{ср}} = v_{\text{max}} \frac{\bar{y}^2}{2} \left[ -\frac{\Delta H_* g H^2}{2AL} \left| \frac{\bar{y}^3}{3} - \frac{\bar{y}^2}{2} \right|_0^1 \right] = v_{\text{max}} + \frac{\Delta H_* g H^2}{12AL} \quad (13)$$

т. е.

$$\frac{v_{\text{ср}}}{v_{\text{max}}} = \frac{1}{1+K} = \frac{1}{2} + \frac{\Delta H_* g H^2}{12AL v_{\text{ср}}(1+K)} \quad (14)$$

После преобразования выражения (14) с учетом формулы (4) получим

$$\text{const} = \frac{J^2 \text{Re} \sqrt{a}}{\text{Fr} \sqrt{d_{\text{дн}}}} \quad (15)$$

где, по М. А. Великанову,  $J = \text{Fr} \frac{\lambda}{2}$ ;

$\text{Re} = \frac{v_{\text{ср}} H}{\nu}$  — число Рейнольдса;  $\lambda = \frac{2gHI}{v_{\text{ср}}^2}$  — коэффициент гидравлического трения;  $\text{Fr} = \frac{v_{\text{ср}}^2}{gH}$  — число Фруда;  $\frac{\sqrt{d_{\text{дн}}}}{I \sqrt{a}}$  — число

Лохтина;  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость на вертикали;  $H$  — средняя глубина на вертикали;  $I = \frac{\Delta H_*}{L}$  — гидравлический уклон на участке русла.

В выражении (15)  $\text{const}$  — безразмерный параметр, учитывающий закон распределения скоростей по вертикали [9] и в соответствии с формулами (11), (15) зависящий от шероховатости русла, т. е. для аллювиальных русел в конечном счете — от средней крупности донных наносов  $d_{\text{дн}}$ . При этом предусматривается, что в аллювиальном спонтанно сформированном турбулентном потоке русле величина отношения крупностей частиц донных наносов, определяющих по В. Н. Гончарову [1] шероховатость русла, к средней крупности близка к постоянной, вследствие отсортировки наносов по крупности частиц самим потоком [10 и др.].

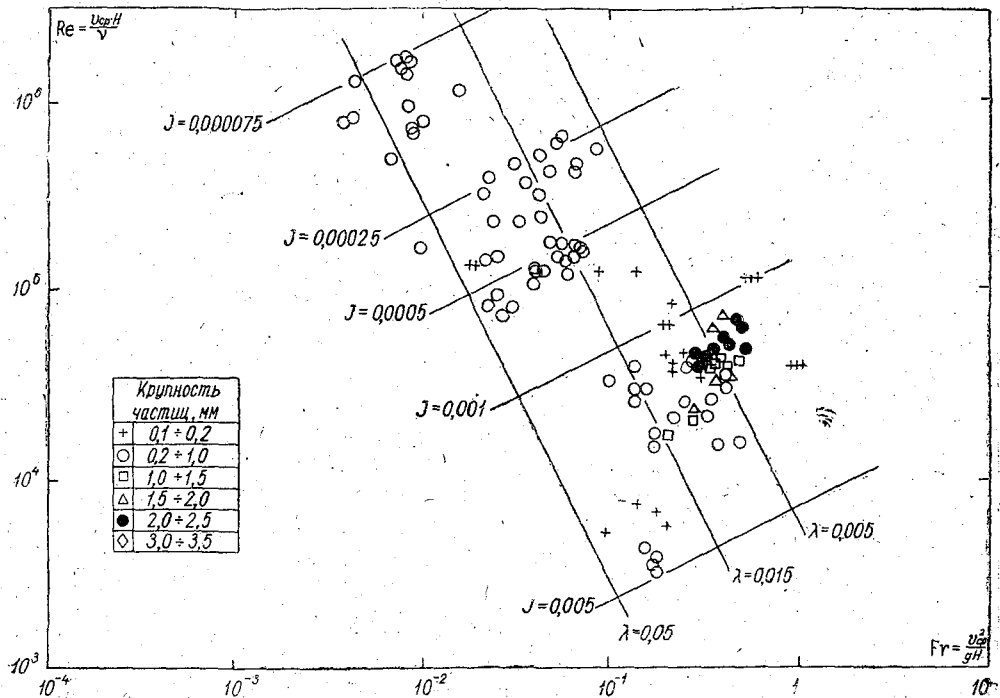


Рис. 2. Зависимость (15) для установившегося режима перемещения донных наносов по исследованиям на реках Волге, Мологе, Вычегде, Кемке и лабораторных моделях при малой мутности потока.



Проверим выражение (15) на материалах натуральных и лабораторных исследований, посвященных изучению перемещения донных наносов со средней крупностью в пределах  $d_{\text{дн}} = 0,01 - 0,25$  см, в потоках с малой мутностью и стационарным режимом течения [12, 13, 14 и др.]. При этом нами использованы материалы натуральных исследований в аллювиальных руслах и тех лабораторных, в которых отношение глубины потока к его ширине мало. Представленные на графике (рис. 2) результаты проверки выражения (15) свидетельствуют о том, что при перемещении донных наносов в аллювиальных руслах определяющими критериями потока с малой мутностью являются числа Рейнольдса и Фруда, гидравлический уклон и, следовательно, коэффициент гидравлических сопротивлений, зависящий от средней крупности донных наносов (в пределах  $d_{\text{дн}} = 0,01 - 0,25$  см).

По формуле (16) А. Ф. Кудряшова

$$\tau = \left( \frac{\sqrt[6]{g} \cdot \gamma_v \cdot v_{\text{ср}}^2 \cdot \sqrt{d_{\text{дн}}}}{100 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt[3]{v} \cdot g} \right) \cdot \left( \frac{\frac{B}{H}}{1,75 + \frac{B}{H}} \right) \quad (16)$$

определяется касательное напряжение, вызываемое потоком малой мутности на аллювиальном дне слабо извилистого канала и естественного русла с учетом их относительной ширины  $\frac{B}{H}$  при перемещении донных наносов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1962. 376 с.
2. Караушев А. В. Речная гидравлика. Л., Гидрометеиздат, 1969. 416 с.
3. Кудряшов А. Ф. О балансовом методе учета стока наносов и оценке интенсивности заиления водохранилищ. — В кн.: Водный баланс и заиление малых водохранилищ ЦЧО, М.—Л., «Наука», 1965, с. 224—242.
4. Великанов М. А. К вопросу о виртуальной вязкости потока. — «Изв. ГГИ», 1929, № 23, с. 5—10.
5. Серебряков А. В. Русловые процессы на судоходных реках с зарегулированным стоком. М., «Транспорт», 1970. 127 с.
6. Юфин А. П. (ред.). Движение наносов и гидравлический транспорт. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. 199 с.
7. Ho Pang-joung. Abhängigkeit der Leschiebewegung von der Temperatur. Mitteilender versuchsanstalt für wasserbau, H. 37, Berlin, 1939, s. 36—52.
8. Lane E. W., Carlson E. J., Manson O. S. Low temperature increases sedimenttransportation in Colorado river. Civil Engineering, IX, 1949, p. 11—22.
9. Образовский А. С. Применение степенной зависимости к построению модели структурного механизма открытого турбулентного потока. — «Труды гидравлической лаборатории ин-та ВОДГЕО», 1955, сб. 4, с. 42—67.

10. Кудряшов А. Ф. Исследование русловых процессов на воздушных моделях. Сб. ЛО НТО Приборпром, вып. 1, Л., Гидрометеоздат, 1957, с. 139—180.
  11. Розовский И. Л., Еременко Е. В., Базилевич В. А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. Киев, «Наукова думка», 1967. 276 с.
  12. Кудряшов А. Ф. О перемещении влекомых наносов. — «Труды ГГИ», 1960, вып. 86, с. 43—52.
  13. Проскуряков А. К., Проскуряков Б. В. Результаты первого этапа работ по изучению влекомых наносов среднего течения р. Волги. Сб. Гидроэнергопроекта, № 3, М.—Л., ГОНТИ, 1938, с. 60—101.
  14. Пушкарёв В. Ф. Движение влекомых наносов. — «Труды ГГИ», 1948, вып. 8 (62), с. 38—72.
-

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИКИ МЕАНДРИРУЮЩИХ РУСЕЛ ПРИ ВЫХОДЕ ВОДЫ НА ПОЙМУ

Гидравлике пойменных русел посвящен ряд исследований [1—9 и др.]. Однако вопрос влияния взаимодействия руслового и пойменного потоков на закономерности движения воды и формирования рельефа дна в меандрирующих руслах является мало изученным. Последнее связано с тем, что большинство экспериментальных работ было выполнено на моделях в условиях параллельных руслах, не дающих представления о гидравлике в целом для всего меандрирующего участка реки. Натурные исследования [4, 9 и др.] ввиду своей трудоемкости и сложности проведения, как правило, носят выборочный или отрывочный характер и не охватывают измерениями совокупности основных морфологических образований (участков плесов и перекатов). В связи с вышесказанным в работе ставилась задача установить влияние выхода воды на пойму на распределение гидравлических характеристик руслового потока по всей длине меандрирующего русла.

Рассмотрим физическую сторону явления взаимодействия руслового и пойменного потоков. На основании исследований, проведенных автором на кафедре инженерной гидрологии ЛПИ им. М. И. Калинина на моделях меандрирующих рек Воронеж, Олёкма, Тунгуска, Халхин-Гол [10, 11 и др.], а также натурных исследований Д. Е. Скородумова [4] можно выделить четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков.

I. Обмен массами жидкости и количествами движения между русловым и пойменным потоками происходит лишь на границе раздела основного русла и поймы. Расход в основном русле при выходе воды на пойму остается постоянным по длине потока. Этот тип взаимодействия в натуральных условиях не является характерным и может наблюдаться лишь на коротких участках, так как требует постоянства вдоль потока гидроморфометрических характеристик отдельных частей живого сечения основного русла и поймы.

II. На участке реки происходит лишь поступление пойменных масс жидкости в русло. Расход в основном русле увеличивается по длине потока.

III. На участке реки происходит лишь выход русловых масс жидкости на пойму. Расход в основном русле уменьшается по длине потока.

IV. Основное русло пересекается транзитным пойменным потоком. На участке реки происходит одновременно и поступление пойменных масс жидкости в основное русло и выход русловых на пойму. Расход в основном русле то увеличивается, то уменьшается по длине потока и лишь на некоторых участках может оставаться постоянным.

К формированию второго и третьего типов взаимодействия потоков приводит разновысотность пойменных массивов, сужение или расширение долины односторонней поймы, изменение шероховатости по длине односторонней поймы.

В зависимости от типа взаимодействия потоков будет происходить и соответствующее изменение гидравлических характеристик руслового потока в условиях выхода его на пойму. При этом общей особенностью гидравлики естественных пойменных русел будет являться то, что с выходом воды на пойму движение жидкости в пределах основного русла происходит с изменением расхода вдоль пути. Для руслового потока уравнение движения жидкости с переменным расходом может быть представлено в следующем виде [12]:

$$\frac{\alpha_0}{2g} \cdot \frac{dv^2}{dx} - i + \lambda \frac{v^2}{2gh} + \frac{\alpha_0 v(v - u_1)}{gQ} \cdot \frac{dQ_1}{dx} - \frac{\alpha_0 v(v - u_2)}{gQ} \cdot \frac{dQ_2}{dx} = 0, \quad (1)$$

где  $\lambda \cdot \frac{v^2}{2gh} = i_f$  — гидравлический уклон, или уклон трения;

$\lambda$  — коэффициент гидравлического трения;  $v$  — средняя скорость потока в основном русле;  $h$  — средняя глубина руслового потока;  $Q$  — расход в основном русле;  $dQ_1$  и  $dQ_2$  — присоединяющийся и отделяющийся расходы;  $u_1$  и  $u_2$  — проекции средних скоростей присоединяющихся и отделяющихся масс жидкости на направление движения потока в основном русле;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\alpha_0$  — корректив количества движения;  $x$  — продольная координата руслового потока по оси основного русла;  $i$  — пьезометрический уклон, или уклон свободной поверхности руслового потока.

В уравнении (1) два последних члена учитывают дополнительные потери энергии, вызываемые взаимодействием руслового и пойменного потоков:

$$i_{ва} = \frac{dh_{ва}}{dx} = \frac{\alpha_0 v(v - u_1)}{gQ} \cdot \frac{dQ_1}{dx} - \frac{\alpha_0 v(v - u_2)}{gQ} \cdot \frac{dQ_2}{dx}. \quad (2)$$

Первый член уравнения (1) представляет собой уклон, вызванный конвективными силами инерции

$$i_{к} = \frac{\alpha_0}{2g} \cdot \frac{dv^2}{dx}. \quad (3)$$

Для установления влияния выхода воды на пойму на характер распределения гидравлических характеристик руслового потока по всей длине меандрирующего русла автором проведено физическое моделирование явления взаимодействия руслового и пойменного потоков. Исследования проводились на схематизированной модели меандрирующей реки (рис. 1). Из классификации рек по характеру русловых и пойменных деформаций, разработанной в Государственном гидрологическом институте Н. Е. Кондратьевым и И. В. Поповым [13 и др.], схематизировался тип ограниченного

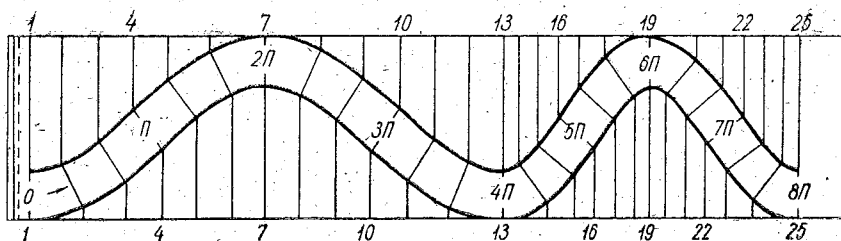


Рис. 1. План схематизированной модели меандрирующей реки:

1 — 1, 4 — 4, 7 — 7 и т. д. — номера гидростворов  
 П — полудлина излучины (расстояние по оси основного русла от вершины излучины до точки перегиба)

меандрирования. По типизации речных пойм, разработанной И. В. Поповым [14], пойменные массивы модели относились к поймам ограниченно меандрирующих рек с благоприятными условиями формирования пойменной фации — поверхность пойменных массивов выровнена. Русло модели принималось прямоугольного сечения шириною 80 см, ширина полосы меандрирования равнялась 3 м. Длина рабочей части модели составляла 13 м. Общий уклон модели был равен 0,005, при уклоне дна в основном русле 0,00427 и 0,00359. Опыты проводились при размываемом и жестком дне русла, различной шероховатости русла и поймы, в условиях их изоляции, а также при различных схемах взаимодействия руслового и пойменного потоков. Для оценки русловых деформаций на модели использовался песок следующего гранулометрического состава:

$$d_{5\%} = 0,12 \text{ мм}; d_{50\%} = 0,25 \text{ мм}; d_{95\%} = 0,70 \text{ мм}.$$

Шероховатость поймы создавалась материалами со следующими параметрами: 1) гладким бетонным покрытием —  $\Delta$  поймы =  $\Delta$  экв. гл. = 0,1 см;  $n = 0,015$ ; 2) гравием —  $\Delta$  поймы = 2,0 см;  $n = 0,032$ ; 3) камнем —  $\Delta$  поймы = 4,0 см;  $n = 0,040$ . Коэффициент шероховатости  $n$  для каждого материала поймы определялся по результатам измерений в гидравлическом лотке шириной 68 см и длиной 8,0 м.

Исследования на модели проводились в 25 створах (см. рис. 1), на 9—11 скоростных вертикалях в каждом створе, пять из которых были назначены в основном русле.

В процессе проведения экспериментов измерялись величина и направление вектора скорости течения с помощью трубки Реббока и нитяного флюгера, определялся рельеф дна размываемого русла и свободной поверхности потока (высокоточным нивелиром НА-1 со специальной рейкой-тастером). В основном русле измерение скорости на вертикали проводилось многоточечным способом (в пяти — восьми точках) через равные расстояния по глубине, а на пойме — в одной — трех точках. В каждой точке вычислялось значение нормальной и поперечной скорости течения;  $v_{\text{норм}} = v_{\text{изм}} \cdot \cos \beta$ ,  $v_{\text{поп}} = v_{\text{изм}} \cdot \sin \beta$ , где  $\beta$  — угол между нормалью к створу и направлением измеренной скорости. Значение средней продольной скорости на вертикали вычислялось аналитически. Дальнейшее вычисление расхода воды проводилось графическим способом. По результатам измерений на модели только в условиях взаимодействия руслового и пойменного потоков было вычислено 438 расходов в основном русле и 640 расходов на пойме. Разность между вычисленным расходом воды и расходом, определенным по водосливу, принималась за ошибку ( $\Delta Q$ ), допущенную при измерении расходов гидрометрическим способом. Статистическая обработка полученного ряда относительных ошибок ( $\Delta Q/Q$ ) показала следующее: 1) норма относительной ошибки измеренных расходов ( $\overline{\Delta Q/Q}$ ) = 1,55%, 2) коэффициент вариации  $C_v = 1,18$  и 3) коэффициент асимметрии  $C_s = 1,61$ .

Средняя отметка свободной поверхности в каждом створе основного русла и поймы вычислялась средневзвешенным способом. За плоскость отсчета глубин принималась середина высоты выступов шероховатости, равная  $0,5 \Delta$ .

Опыты на неразмываемой модели проводились при двух наполнениях основного русла в пределах бровок:  $h_{1 \text{ бр}} = 9,0$  см и  $h_{2 \text{ бр}} = 19,0$  см, которым соответствуют следующие числа  $Re$ ,

$$Fr, \lambda \frac{b}{h}, \frac{Fr}{i}, \frac{Fr}{i_f}:$$

$$Re_1 = 29700 \div 34300 \text{ и } Re_2 = 91600 \div 107000; Fr_1 = 0,125 \div 0,168$$

$$\text{и } Fr_2 = 0,127 \div 0,173; \left( \lambda \frac{b}{h} \right)_1 = 0,334 \div 0,683 \text{ и } \left( \lambda \frac{b}{h} \right)_2 = 0,099 \div 0,349;$$

$$\left( \frac{Fr}{i} \right)_1 = 25,8 \div 57,7 \text{ и } \left( \frac{Fr}{i} \right)_2 = 23,8 \div 94,0; \left( \frac{Fr}{i_f} \right)_1 = 26,0 \div 53,2$$

$$\text{и } \left( \frac{Fr}{i_f} \right)_2 = 24,2 \div 85,2,$$

где  $b$  — ширина основного русла.

Из опытных данных следует, что  $i_{бр} \approx i_f$ , т. е. режим движения жидкости в основном русле в пределах бровок по средней скорости и глубине близок к равномерному.

Опыты проводились при условии, что числа  $Re > Re_{гр}$ , т. е. в автомодельной области. Граница автомодельной области определ

ялась по формуле:  $Re_{гр} = \frac{63 \cdot h}{k \cdot \sqrt{\lambda}}$ , где коэффициент гидравличе

ского трения  $\lambda$  вычислялся по формуле Никурадзе для гладкой

области:  $\lambda = 0,0008 + \frac{0,04}{Re^{0,237}}$ .

В опытах на размываемой модели средняя глубина основного русла в пределах бровок составляла  $6,6 \div 10,0$  см,  $\left(\lambda \frac{b}{h}\right)_{бр} = 0,167 \div 0,427$ .

Исследования показали, что зависимость изменения средней скорости руслового потока как для участка в целом  $v = f(x)$ , так и для каждого створа в отдельности  $v = f(h)$  определяется характером изменения расхода в основном русле  $Q = f(x)$ , который в свою очередь зависит от типа взаимодействия.

В связи с этим рассмотрим изменение средней скорости руслового потока и прочих гидравлических характеристик для каждого типа взаимодействия.

I тип взаимодействия характеризуется уменьшением средней скорости руслового потока при выходе воды на пойму по сравнению со скоростью потока в условиях его изоляции. Последнее обычно объясняется результатом увеличения турбулентных касательных напряжений на границе раздела взаимодействующих потоков. Средняя скорость руслового потока остается постоянной вдоль русла.

Из условия постоянства расхода по длине руслового потока следует, что объемы жидкости, вносимые и выносимые из основного русла, равны между собой. Поэтому в уравнениях (1) и (2)  $dQ_1 = dQ_2$ . Величина изменения потерь энергии в этом случае учитывается двумя членами уравнения (2).

II тип взаимодействия характеризуется увеличением расхода в русле и, как показали исследования (рис. 2, кривые 2 и 3 на участке  $O - 2П$ ), увеличением средней скорости потока по длине русла. Уклон свободной поверхности руслового потока при взаимодействии увеличивается по сравнению с уклоном в условиях изоляции. Средняя скорость руслового потока при взаимодействии в верховье участка уменьшается, а в нижней части увеличивается по сравнению с условиями изоляции  $\left(\frac{v}{v_{из}}\right)$ . Степень изменения

средней скорости определяется интенсивностью увеличения расхода на участке, что зависит от шероховатости поймы и наполнения в русле. При этом уменьшение шероховатости поймы,

а также увеличение наполнения приводит к усилению интенсивности изменения средней скорости руслового потока (рис. 2). Величина дополнительных потерь энергии учитывается первым членом уравнения (2).

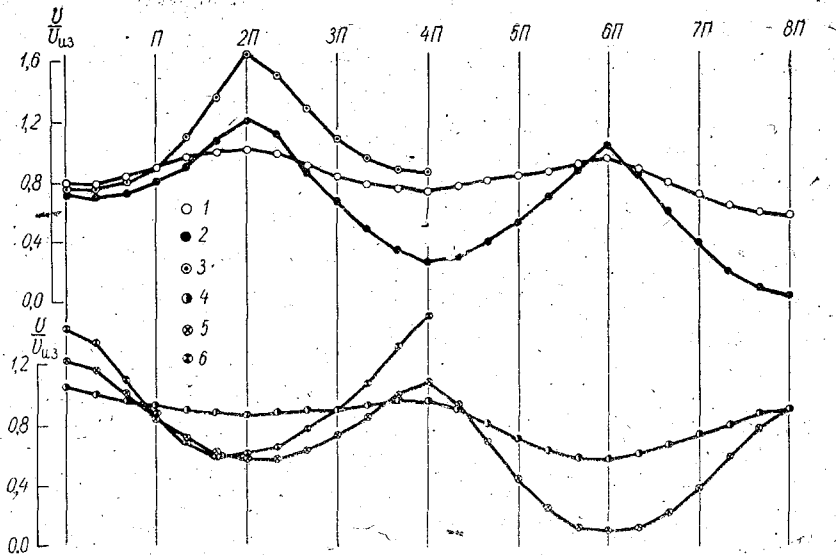


Рис. 2. Распределение относительных скоростей  $\frac{u}{u_{из}}$  по длине руслового потока ( $h_{бр} = 9,0$  см):

1, 2, 3 — изолированные (незатопляемые) правобережные пойменные массивы:

1 —  $Q_{\text{модели}} = 46,7$  л/с,  $\frac{h}{h_{бр}} = 1,44 \div 1,62$ ,  $n_{\text{поймы}} = 0,040$ ; 2 —  $Q_{\text{модели}} = 46,7$  л/с,

$\frac{h}{h_{бр}} = 1,28 \div 1,54$ ,  $n_{\text{поймы}} = 0,015$ ; 3 —  $Q_{\text{модели}} = 79,1$  л/с,  $\frac{h}{h_{бр}} = 1,50 \div 1,79$ ,  $n_{\text{поймы}} =$

$= 0,032$ ; 4, 5, 6 — изолированные (незатопляемые) левобережные пойменные массивы:

4 —  $Q_{\text{модели}} = 46,7$  л/с,  $\frac{h}{h_{бр}} = 1,39 \div 1,65$ ,  $n_{\text{поймы}} = 0,040$ ; 5 —  $Q_{\text{модели}} = 46,7$  л/с,

$\frac{h}{h_{бр}} = 1,24 \div 1,62$ ,  $n_{\text{поймы}} = 0,015$ ; 6 —  $Q_{\text{модели}} = 79,1$  л/с,  $\frac{h}{h_{бр}} = 1,59 \div 1,86$ ,  $n_{\text{поймы}} = 0,032$

Исследования показали, что в этом случае потери энергии в основном русле возрастают за счет величины  $i_{вз}$ . Исключение составляют лишь некоторые участки с «гладкой» поймой, где при  $\frac{Q_1}{Q} > 0,2 - 0,3$  величина  $i_{вз}$  оказывается меньше нуля. Величина потерь энергий на взаимодействие  $i_{вз}$  изменяется по длине излучины и при шероховатой пойме возрастает с увеличением  $\frac{Q_1}{Q}$ .



III тип взаимодействия характеризуется уменьшением расхода и средней скорости руслового потока вдоль русла (рис. 2). В этом случае на участке наблюдается уменьшение и даже появление обратного уклона свободной поверхности. Средняя скорость руслового потока при взаимодействии лишь в верховье увеличивается, а в нижней части значительно уменьшается по сравнению с условиями его изоляции  $\left(\frac{v}{v_{из}}\right)$ . Степень изменения средней скорости определяется интенсивностью уменьшения расхода на участке, что также зависит от шероховатости поймы и наполнения в русле. Ветового потока при взаимодействии лишь в верховье увеличивается, последним членом уравнения (1) или (2). Величина  $i_{вз}$  только при  $\frac{Q_2}{Q} < 0,2-0,3$  имеет отрицательное значение. С увеличением наполнения величина  $i_{вз}$  возрастает. Уменьшение шероховатости поймы приводит к существенному возрастанию  $\frac{Q_2}{Q}$  и  $i_{вз}$ .

IV тип взаимодействия является наиболее общим и характерным. Исследования показали, что расход воды и средняя ее скорость в основном русле не остаются постоянными по длине; то увеличиваясь, то уменьшаясь в пределах 10÷20%, они достигают максимальных значений в вершинах излучин (на плесах) и минимальных — ниже точек перегиба (на перекатах) (рис. 3). Средняя скорость руслового потока при взаимодействии по всей длине уменьшается по сравнению со средней скоростью в условиях его изоляции. Исключения составляют лишь некоторые участки с очень малой шероховатостью поймы. Величина дополнительных потерь энергии в этом случае учитывается двумя членами уравнения (2).

Распределение относительной величины этих потерь  $\left(\frac{i_{вз}}{i_{фбр}}\right)$  по длине основного русла представлено на рис. 3. Из рисунка видно, что своего максимального значения потери энергии, связанные с взаимодействием, достигают на участках перекатов. С увеличением шероховатости поймы величина  $i_{вз}$  возрастает по всей длине основного русла.

Исследования, проведенные с размываемым руслом, показали, что с выходом воды на пойму происходит интенсивное наращивание высоты переката. Последнее и является результатом более значительного уменьшения пропускной и, следовательно, транспортирующей способности перекатов в условиях выхода воды на пойму по сравнению с пропускной и транспортирующей способностью плесов. При достижении вершиной переката во входной части закругления бровки выпуклого берега происходит вынос наносов на пойму. Место выхода наносов на пойму может варьировать в пределах от точки перегиба до нижележащей вершины выпуклого берега. Примыкание гребня переката к выпуклому бе-

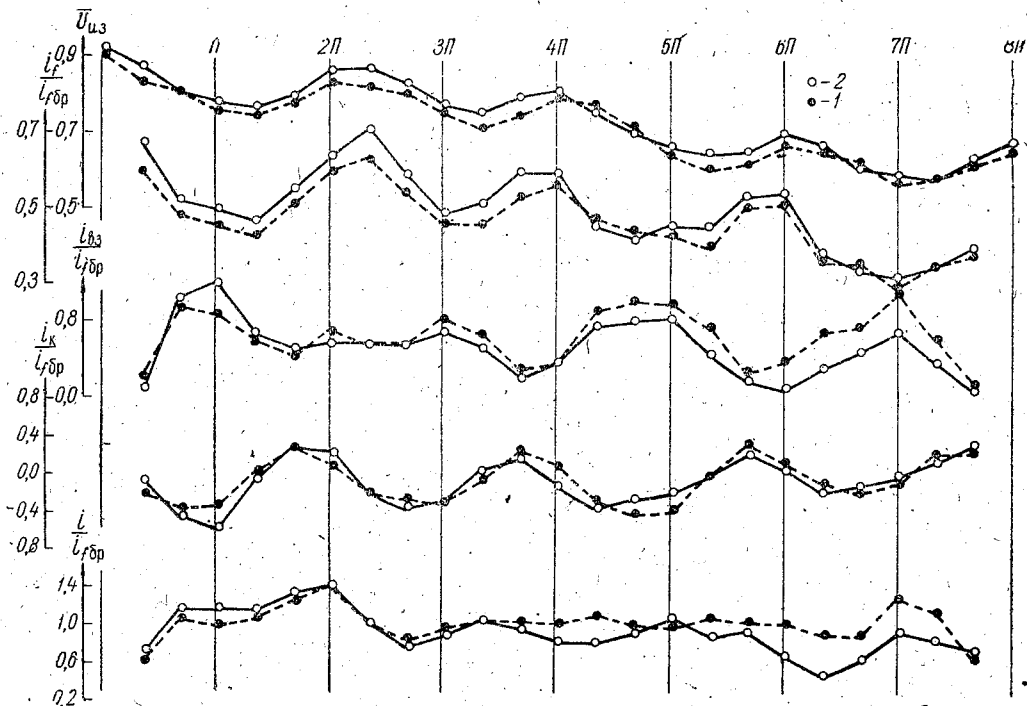


Рис. 3. Распределение гидравлических характеристик  $\frac{v}{v_{из}}$ ,  $\frac{i_f}{i_{f\ бр}}$ ,  $\frac{i_{вз}}{i_{f\ бр}}$ ,  $\frac{i_к}{i_{f\ бр}}$ ,  $\frac{i}{i_{f\ бр}}$  по длине руслового потока ( $Q_{модели} = 79,1$  л/с,  $h_{бр} = 9,0$  см):

$$1 - n_{поймы} = 0,940, \quad \frac{h}{h_{бр}} = 1,71 \div 1,83; \quad 2 - n_{поймы} = 0,032, \quad \frac{h}{h_{бр}} = 1,59 \div 1,73$$

регу, являясь причиной выхода наносов на пойму и роста отмелей у него, создает благоприятные условия для образования береговых валов.

Известно, что поперечные скорости на криволинейном участке реки являются результатом возникновения скоростей поперечной циркуляции и скоростей смещения. Скорости поперечной циркуляции описываются формулой вида [7, 15]

$$v_r = v_{cp} \cdot \frac{h}{r} \cdot k, \quad (4)$$

где  $k$  определяется в основном относительным расстоянием точки от дна, положением вертикали в створе и местоположением створа по длине закругления.

В результате того, что распределение средних скоростей по ширине потока для различных створов не является одинаковым на закруглении возникают скорости смещения

$$v_{см} = \frac{\Delta Q}{l \cdot h}, \quad (5)$$

где  $\Delta Q$  — изменение расхода на длине  $l$  между створами 1 и 2 в выделенном отсеке основного русла шириною  $\Delta b$ :

$$\Delta Q = \Delta b \cdot h \cdot (v_1 - v_2). \quad (6)$$

Откуда

$$v_{см} = \frac{\Delta b (v_1 - v_2)}{l}. \quad (7)$$

Скорости смещения, так же как и скорости поперечной циркуляции, изменяются по длине, ширине и глубине потока. Результирующая скорости смещения и скорости поперечной циркуляции является поперечной скоростью в потоке, обуславливающей перенос донных наносов в поперечном направлении.

Исследования показали, что наращиванию переката благоприятствует и то, что в условиях выхода воды на пойму происходит увеличение скоростей смещения  $v_{см}$ , направленных в поверхностном слое от выпуклого к вогнутому берегу, и, следовательно уменьшение поперечных скоростей в придонной области, направленных от вогнутого к выпуклому берегу, а при значительных наполнениях и появление поперечных скоростей иного знака. Отложение наносов у выпуклого берега на выходе из закругления уменьшается, происходит отжим их пойменным потоком на участок переката к нижележащему выпуклому берегу. Неравномерное уменьшение пропускной способности руслового потока по длине меандрирующего русла в условиях выхода воды на пойму и, как следствие, значительное наращивание перекатов создают благоприятные условия к самоспрявлению излучин.

Из приведенного анализа следует, что эффективной защитой от катастрофического (для судоходства) наращивания переката в условиях выхода воды на пойму может явиться лишь такое конструктивное мероприятие, которое будет направлено на увеличение расхода на участке переката в период паводка. Последнее может быть осуществлено путем обвалования реки на том или ином участке.

Подводя итог проведенным исследованиям необходимо подчеркнуть, что гидравлика меандрирующих русел при выходе воды на пойму определяется объемом и скоростью как поступающих в русло пойменных масс жидкости, так и выходящих из него на пойму. Последнее целиком обусловлено гидроморфологией основного русла и поймы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барышников Н. Б., Саликов В. Г. Энергетические затраты при взаимодействии отсеков потока с различной шероховатостью. — «Метеорология и гидрология», 1968, № 9, с. 63—67.
2. Исследования динамики русловых потоков. — «Труды ЛГМИ» 1972, вып. 46. 123 с.
3. Спицын И. П. О взаимодействии потоков основного русла и поймы. — «Метеорология и гидрология», 1962, № 10, с. 22—27.
4. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. — «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—97.
5. Соколов Ю. Н. Кинематический эффект в деформируемых руслах с поймами. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1967. 25 с. (МИИТ).
6. Железняков Г. В. Теоретические основы гидрометрии, Л., Гидрометеиздат, 1968. 291 с.
7. Гончаров В. Н. Динамика русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1962. 374 с.
8. Ле Ван Киен. О гидравлическом расчете пойменных русел. — «Гидротехника и мелиорация», 1968, № 9, с. 50—52.
9. Гидроморфологические исследования пойменного и руслового процессов. — «Труды ГГИ», 1970, вып. 183, с. 54—68.
10. Саликов В. Г., Александров Л. Н. Гидравлические исследования спрямления русла р. Воронеж в районе завода «Свободный Сокол». Научные исследования по гидротехнике в 1971 году, том. 2. Л., «Энергия», 1973, с. 77—78.
11. Саликов В. Г., Александров Л. Н. Гидравлические исследования и обоснование на моделях мероприятий по защите от подмывов полотна Байкало-Амурской железнодорожной магистрали, отсыпаемого в воду на участке прижима р. Олекмы. Научные исследования по гидротехнике в 1971 году, т. 2. Л., «Энергия», 1973, с. 80.
12. Петров Г. А. Гидравлика переменной массы. Харьков, Изд-во Харьковского университета, 1964. 224 с.
13. Рекомендации по учету естественных циклических деформаций русел равнинных рек при строительном проектировании. Л., Гидрометеиздат, 1969. 31 с.
14. Попов И. В. Типы речных пойм и их связи с типами руслового процесса. — «Труды ГГИ», 1968, вып. 155, с. 39—55.

15. Розовский И. Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев, Изд-во АН УССР, 1957. 188 с.
16. Саликов В. Г. Экспериментальное исследование движения воды и формирования рельефа дна в открытом изогнутом русле при выходе потока на пойму. — «Изв. вузов СССР — Энергетика», 1972, № 1, с. 109—115.
17. Саликов В. Г. Некоторые результаты экспериментальных исследований взаимодействия руслового и пойменного потоков. Тезисы докладов IV Всесоюзного гидрологического съезда. Л., Гидрометеиздат, 1973, с. 14—15.
18. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие. — «Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 1958, т. 59, с. 62—81.
19. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л., «Энергия», 1967. 235 с.
20. Гиляров Н. П. Моделирование речных потоков. Л., Гидрометеиздат, 1973. 200 с.



А. К. ХАПАЕВА (ЛПИ)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО БЕСПЛОТИННОГО ВОДОЗАБОРА

Для целей промышленного водоснабжения, а также мелиорации большой интерес представляет определение предельного водозабора из реки при минимальных расходах воды в период летней и зимней межени. Имеется ряд работ, посвященных этому вопросу [1, 2, 3]. Однако специфика задачи заключается в разнообразной конфигурации, своеобразии гидрологии и геологического строения русел, все это приводит к необходимости осуществлять моделирование участка реки для определения предельного водозабора.

Изучение режима работы водозабора при расходах 95 и 97% -ной обеспеченности требует сооружения моделей крупного масштаба, но размеры модели часто ограничиваются возможностями лабораторных площадок. Поэтому при минимальных меженных расходах часто приходится прибегать к «форсировке» их, с тем чтобы получить на модели значения чисел Рейнольдса, превышающие допустимые, и обеспечить развитый турбулентный режим течения.

Нами была разработана методика определения предельного водозабора в процессе исследований водозаборного ковша для энергетического объекта.

Для этих целей была сооружена гидравлическая модель в масштабе 1:20 натуральной величины, охватывающая весь водозабор, включая его береговую и пойменную части общей длиной около 200 м, и участок русла длиной около 110 м. Из-за малой длины моделируемого участка граничные условия были предварительно определены на модели масштаба 1:50, где исследовались эформации русла в пределах водозабора в период прохождения аводка.

Для ковша и русла была найдены допустимые числа Рейнольдса, при которых на модели наблюдался турбулентный режим

$$Re_{\pi} = \frac{14 R}{k\sqrt{\lambda}},$$

где  $R$  — гидравлический радиус;  $k$  — абсолютная шероховатость;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического трения, определяемый по формуле А. П. Зегжды для открытых потоков [4, 5]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 4 \lg \frac{R}{k} + 4,25.$$

При этом допустимое число Рейнольдса для ковша оказалось равным  $Re_{д.к.} = 13100$ , а для русла  $Re_{д.р.} = 4680$ . При минимальном расходе воды в реке (97%-ной обеспеченности) числа Рейнольдса в ковше и в реке оказались соответственно равными  $Re_k = 4070$ ,  $Re_p = 1170$  (табл. 1, 2). Как видно, числа Рейнольдса на модели меньше допустимых. В связи с этим было решено осуществить форсировку расхода при уровне воды в реке, соответствовавшем минимальному расходу.

Так как во всех естественных руслах течение характеризуется наличием водоворотов, то необходимо, чтобы размеры водоворотов на модели и в натуре были бы подобны. При отрывных течениях обнаруживается автомодельность по Фрудру. Так, относительные размеры водоворотных зон не изменяются при условии  $Fr < 0,1 \div 0,2$  [6, 7]. При форсировке расхода числа Фруда на модели не превышали значения  $Fr \leq 0,1$ , что обеспечивало подобие водоворотных зон на модели и в натуре.

Таблица 1

Результаты расчета параметров потока в ковше при форсированном расходе

$Q$ , л/с	$\omega$ , см <sup>2</sup>	$R$ , см	$u_{ср.к.}$ , см/с	$Fr$	$Re_k$	$Q_{ф}/Q_k$
2,8	544	7,9	5,15	0,0034	4070	1
4,2	"	"	7,80	0,0079	6150	1,5
5,6	"	"	10,30	0,0137	8,50	2
8,4	"	"	15,50	0,0310	12250	3
11,2	"	"	20,60	0,0548	16300	4
14,0	"	"	25,80	0,0845	20400	5

В таблице  $u_{ср.к.}$  — средняя скорость течения в ковше,  $Q_{ф}$  — форсированный расход,  $Q_k$  — расход в ковше.

Таблица

Результаты расчета параметров русла при форсированном расходе

$Q$ , л/с	$\omega$ , см <sup>2</sup>	$h_{ср.}$ , см	$u_{ср.р.}$ , см/с	$Fr$	$Re_p$	$Q_{ф}/Q$
2,8	1590	6,5	1,8	0,0003	1170	1
4,2	"	"	2,6	0,0011	1720	1,5
5,6	"	"	3,5	0,0019	2280	2
8,4	"	"	5,3	0,0044	3160	3
11,2	"	"	7,1	0,0079	4600	4
14,0	"	"	8,8	0,0122	5700	5

Здесь  $u_{ср.р}$  — средняя скорость воды в реке,  $Q_p$  — расход воды в реке.

Как можно видеть из таблиц, при  $Q_{\phi}/Q_p > 3$  получаем  $Re_k > Re_{д.к}$  и при  $Q_{\phi}/Q_p \geq 4$  имеем  $Re_p \geq Re_{д.р}$ . В этих условиях коэффициент предельного водозабора не зависит от числа  $Re$ .

На рис. 1 показано изменение предельного водозабора ( $k_1 = Q_k/Q_p$ ) от числа Рейнольдса в ковше. На графике видно, что при  $Re_{д.к} = 12250$  ( $Q_{\phi}/Q_p \approx 3$ ) наблюдалась автомодельность параметра  $k_1$ , при этом числа  $Fr$  изменялись при принятой форсировке в пределах  $0,003 \div 0,085$ . Следовательно, в исследованном диапазоне форсировки расхо­дов нарушения подобия водоворотных областей на модели и в натуре не наблюдалось.

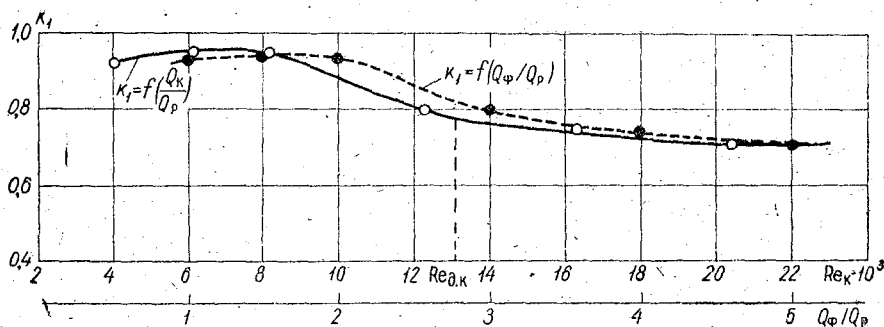


Рис. 1. Изменение предельного водозабора в зависимости от числа Рейнольдса и «форсировки» расхода.

Исследования предельного бесплотинного водозабора выполнялись на большой гидравлической модели. Для обеспечения заданного распределения скоростей течения в моделируемом русле во входном створе модели устанавливались направляющие, позволявшие регулировать распределение скоростей течения; в конце ковша был сделан мерный треугольный водослив. Исследования проводились следующим образом. На модель подавался заданный расход воды, выход из ковша полностью перекрывался и при помощи регулирующего затвора, расположенного в конце русла, устанавливался уровень, соответствовавший заданному расходу. После этого открывался затвор в ковше и при форсировке расходов ( $Q_{\phi}/Q_p = 1; 1,5; 2; 3; 4; 5$ ) по мерному водосливу определялись расходы воды, поступающие самотеком в канал, и уровни в нем. Затем определялись перепады уровней и коэффициенты водозабора.

В результате исследований были получены величины предельного водозабора при разных форсировках расхода (см. рис. 1). Коэффициент предельного водозабора оказался равным  $k_1 = 0,70 \div 0,75$ , что несколько меньше величины, рекомендуемой другими исследователями для подобных условий [3].



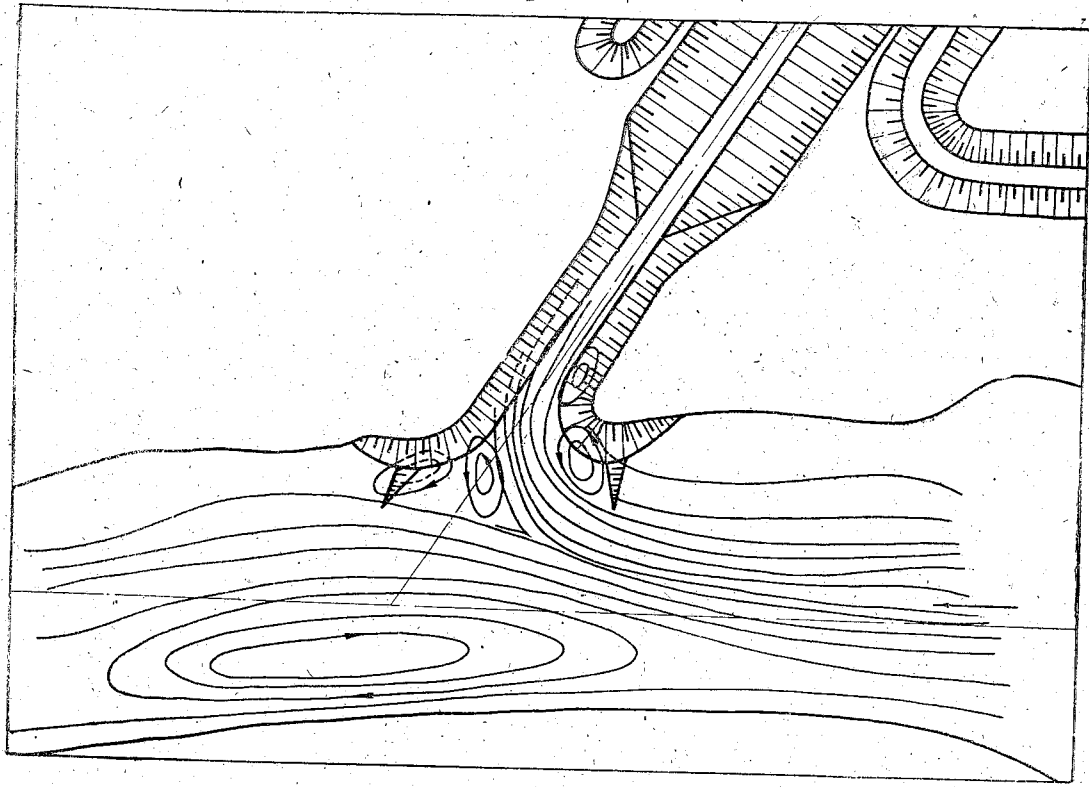


Рис. 2. План течения на входе в ковш.

При всех форсировках расходов и без форсировки получены визуально траектории движения частиц жидкости на входе в ковш. В условиях предельного водозабора наблюдался явно выраженный режим деления потока. На входе в ковш формировалась весьма сложная картина течения (рис. 2).

Было отмечено, что у противоположного берега перед каналом образовалась обширная водоворотная область, которая в зимний период может служить источником образования зажоров. Поэтому если водозабор работает в течение круглого года, что характерно для промышленного водоснабжения, в соответствии с имеющимися рекомендациями [1] коэффициент водозабора в период шугохода не должен превышать 0,4.

На основании выполненных исследований можно рекомендовать использовать принятую методику для определения предельного водозабора при минимальных расходах воды в реке.

Для условий, аналогичных рассмотренным, коэффициент предельного водозабора следует принимать равным  $k_1 = 0,70 \div 0,75$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аверкиев А. Г., Макаров Н. И., Синотин В. И. Бесплотинные водозаборные сооружения. М., «Энергия», 1969, с. 33—64.
2. Образовский А. С. Гидравлика водоприемных ковшей. М., Госстройиздат, 1962, с. 71—169.
3. Синотин В. И. Максимальный бесплотинный водозабор. — «Известия ВНИИГ», т. 66, 1960, с. 109—121.
4. Зегжда А. П. Теория подобия и методика расчета гидротехнических моделей. М.-Л., Госстройиздат, 1967, с. 36—42, 55—81, 91—118.
5. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л., «Энергия», 1967, с. 61—64, 69—71.
6. Михалев М. А. Гидравлический расчет потоков с водоворотами. Л., «Энергия», 1967. 184 с.
7. Михалев М. А. Материалы по моделированию некоторых видов движения вязкой жидкости. — «Известия ВНИИГ», т. 108, 1975, с. 27—39.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА В МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ

Широкий размах ирригационного строительства вызывает необходимость проведения исследований проектируемых каналов в лабораторных условиях. В связи с проектированием необлицованных каналов большой пропускной способности особенно актуальным представляется изучение возможности допущения в них скорости течения  $u$ , превышающей неразмывающую скорость  $u_0$ , при условии обеспечения устойчивости русла.

Разработке методов моделирования руслового процесса на размываемых моделях был посвящен ряд работ; наиболее обоснованные методы содержатся в [1]. В этой работе рассматривается возможность воспроизведения руслового процесса при использовании в качестве размываемого материала частиц кварца, уменьшенных в масштабе глубины. Однако такой метод применим только для моделирования русел, сложенных гравием. К неточностям этого метода, отмеченным самим автором, относится то, что при расчете сопротивления не учитывается грядовое строение русла, коэффициент гидравлического трения  $\lambda_r$ , значение которого существенно больше значения соответствующего коэффициента для русла не грядового строения.

Для исследования русел, сложенных мелкозернистыми песками, в работе [1] рекомендуется применять в качестве размываемого материала различные порошки-заменители, имеющие плотность  $\rho_1$ , меньшую, чем плотность кварца. Однако исследования на таких моделях дают весьма приближенные результаты и требуют предварительных опытов для определения коэффициента сопротивления модели. Многие исследователи, работающие в этой области, рекомендуют увеличивать скорость потока и твердый расход сверх рассчитанных по правилам моделирования («форсировка расходов»). Как правило, в этих работах не указывается ни область применения метода, ни погрешности, к которым приводит отличие модельных чисел и критериев подобия от натуральных [2].

Был предложен метод моделирования руслового процесса, основанный на достижении подобия русловых форм, а именно равенства на модели и в натуре крутизны гряд [3]. Однако этот метод

нуждается в доработке и имеет следующие недостатки. Графики, построенные для расчета моделей, относятся к большим числам Фруда, редко встречающимся в реках и каналах, протекающим по равнинам. В методе рекомендуется использовать в качестве размываемого материала специальные заменители, имеющие гранулометрический состав, отличающийся от состава натурального песка. Это приводит к невозможности учета такого фактора, как разнородность грунта, играющего исключительно важную роль в процессе развития самоотмостки русла. Неизбежная форсировка на модели расхода, а следовательно, увеличение числа Фруда может привести к образованию бурного режима течения, в то время как в натуре поток спокойный. И наконец, в рекомендациях, приведенных в работе [3], ничего не говорится о моделировании твердого расхода. Можно, например, наносы не подавать в начало модели, тогда русло будет находиться в условиях общего размыва; при этом, как известно [4], размеры гряд получаются иными, чем при транзитном перемещении донных наносов.

В работе [5] предлагается считать подобными естественные потоки в деформируемых руслах, если соблюдены следующие критерии подобия:

$$Fr = \text{idem}; R/\chi = \text{idem}.$$

Здесь  $Fr$  — число Фруда;  $R$  — гидравлический радиус сечения;  $\chi$  — смоченный периметр. В результате обработки данных натуральных наблюдений показано, что для мелкозернистых песков подобие относительной шероховатости  $n$  не является необходимым. Этот факт, по всей видимости, объясняется тем, что у равнинных водотоков со спокойным течением уклоны дна  $i$  и коэффициенты гидравлического трения мало отличаются друг от друга. Однако в искусственных каналах эти параметры могут быть совершенно иными. Неясен также вопрос о возможности применения указанных выше критериев подобия при моделировании натуральных потоков. Если при моделировании будет использован тот же размываемый материал, что и в натуре, то требование  $Fr = \text{idem}$  приведет к тому, что на модели скорость окажется гораздо меньше размывающей. Нельзя согласиться с утверждением автора о том, что при  $Fr = \text{idem}$  в натуре и на модели обеспечивается равенство относительных размеров гряд; результаты, приведенные в работе [3], не подтверждают это положение.

Попытаемся сформулировать основные требования моделирования русловых деформирующихся потоков.

Первое и неперемное условие любого моделирования, вытекающее из условий однозначности, заключается в соблюдении геометрического подобия. Для деформирующегося русла, как известно, характерно наличие прямых и обратных связей между формой русла и скоростным полем потока. С одной стороны, поток создает себе русло, которое соответствует его скоростному полю. С другой стороны, русло, воздействуя на поток, формирует его ско-

ростное поле. Следовательно, моделирование должно быть таким, чтобы в процессе деформаций на модели создавалось русло, геометрически подобное натурному. В широких руслах очертание дна имеет незначительную кривизну и форму русла можно характеризовать отношением ширины русла  $B$  к средней глубине  $H_{\text{ср}}$  ( $H_{\text{ср}} = \frac{\omega}{B}$ , где  $\omega$  — площадь живого сечения). Следует также

иметь в виду, что геометрия русла характеризуется не только осредненным очертанием, но и грядовыми образованиями.

Как известно из теории подобия, кроме соблюдения условий однозначности, для подобия явлений необходимо соблюдение равенства чисел подобия. В случае установившегося движения это условие записывается так:

$$Eu = \text{idem}, Re = \text{idem}, Fr = \text{idem},$$

где  $Eu$  и  $Re$  — соответственно числа Эйлера и Рейнольдса.

Отметим, что выполнение строгого равенства чисел подобия часто бывает необязательным, например, в тех случаях, когда модельный и натуральный потоки относятся к автомодельной области по данному числу подобия.

В практике моделирования чаще всего предполагается автомодельность по числу Рейнольдса. Установим возможность использования на модели того же песка, которым сложено естественное русло, и определим, каким требованиям должен отвечать модельный поток.

Известно, что если движение равномерное или плавно изменяющееся, то число Эйлера равно половине коэффициента гидравлического трения ( $Eu = \frac{\lambda}{2}$ ), величина которого определяется грядовыми образованиями. В свою очередь, их относительные размеры по данным многих исследователей [3, 4] зависят от отношения средней скорости потока к неразмывающей. Неразмывающая скорость является функцией среднего диаметра частиц песка  $d_0$ , их относительной плотности, коэффициента гидравлического трения русла, имеющего плоское дно,  $\lambda_b$ , который, по данным [10], в общем случае определяется числом Рейнольдса и относительной шероховатостью  $R/d_k$ , где  $d_k$  соответствует по кривой гранулометрического состава 95%.

В работе [4] относительная высота ( $h_r/R$ ) и относительная длина ( $l_r/R$ ) гряд вычисляются по формулам:

$$\frac{h_r}{R} = \frac{3,5(1 - u_0/u)^{2/3}}{6 + \lg R/d_0}; \quad (1)$$

$$\frac{l_r}{R} = \frac{2,8}{1 - u_0/u} \quad \text{при } d_0 > 0,7 \text{ мм}; \quad (2)$$

$$\frac{l_r}{R} = 10 \frac{h_r}{R} \quad \text{при } d_0 \leq 0,7 \text{ мм}. \quad (2a)$$

Следует отметить, что эти формулы дают удовлетворительные результаты для русел, дно которых сложено песком, имеющим средний диаметр частиц)  $d_0 > 0,7$  мм. Мелкозернистые пески при  $\frac{u}{u_0} > 1$  порождают донные формы в виде рифелей [4]. Высота рифелей может определяться по формуле (1) только в первом приближении. Особенно большие ошибки формула дает при малых отношениях  $\frac{R}{d_0}$ .

Коэффициент гидравлического трения дна, покрытого грядами, согласно работе [4], определяется как функция относительных размеров гряд и коэффициента гидравлического трения  $\lambda_R$ :

$$\lambda_r = 0,205 (h_r/l_r) (h_r/R)^{0,25} + \lambda_R (1 - 10 h_r/l_r). \quad (3)$$

Из вышеизложенного видно, что основное условие моделирования  $Eu = idem$  может быть достаточно полно реализовано, если на модели и в натуре обеспечено равенство отношения  $\frac{u}{u_0}$ , так как именно этим отношением в основном определяются относительные размеры гряд, а следовательно, и коэффициент гидравлического трения  $\lambda_r$ .

Для того чтобы оценить, какие погрешности в определении  $\frac{h_r}{R}$ ,  $\frac{l_r}{R}$ ,  $\lambda_r$  дает соблюдение равенства  $\frac{u}{u_0}$  в двух геометрически подобных потоках, линейные размеры которых значительно (в 10, 100, 1000 раз) разнятся между собой, была проведена серия расчетов. Эти расчеты показали, что для протекающих в мелкозернистых песках потоков расхождение для модели и натуре в значениях  $\frac{h_r}{R}$  не превышает 10 ÷ 15%. В случае крупнозернистого грунта ( $d_0 > 0,7$  мм) получить такое соответствие не удастся. Это объясняется тем, что сопротивление русла, сложенного грядами, для мелкозернистого материала, главным образом, определяется формой и размерами гряд, в то время как для крупнозернистого материала еще и шероховатостью их поверхности.

Однако равенство чисел Эйлера достигается путем увеличения скорости на модели по сравнению со скоростью, рассчитанной по правилам моделирования по Фрудю. Естественно, что для сохранения на модели такого же режима движения, что и в натуре, нужно ограничить на модели число Фруда. Этот вопрос в первом приближении можно решать, используя результаты исследований, изложенных в работе [12]. Они показывают, что выступы шероховатости, имеющие относительную высоту  $< 0,5$  (предельная высота грядовых образований), практически не оказывают воздей-

ствия на состояние свободной поверхности до значения числа Фруда  $Fr=0,2$ . При  $Fr>0,2$  на поверхности воды образуются волны, что является проявлением бурного характера течения. Как известно, почти все естественные потоки характеризуются наличием водоворотов. Для обеспечения в потоках подобия водоворотных областей необходимо выполнение условия  $\lambda \frac{B}{H_{cp}} = idem$  [6].

Спрашивается, будет ли на всех этапах деформации русла одинаковым для модели и природы отношение  $\frac{B}{H_{cp}}$ . Ответ на него дают морфометрические зависимости, наиболее обоснованные из которых приводятся в работе [7], из них вытекает;

$$\frac{B}{H_{cp}} = f\left(\frac{u}{u_0}\right). \quad (4)$$

Подобный вывод логически следует и из работы Ф. Энгелунда и О. Сквгора [8], в которой на основе теории малых возмущений для трехмерного потока получено, что заданным значениям глубины и сопротивления дна отвечает определенное значение ширины русла при том или ином виде русловых деформаций.

Можно утверждать, что потоки при условии  $\frac{u}{u_0} = idem$  практически будут относиться к автомодельной области по числу Рейнольдса. С одной стороны, граничное число Рейнольдса, судя по рекомендациям, уменьшается при увеличении коэффициента гидравлического трения и относительной шероховатости, с другой стороны — за счет форсировки расхода число Рейнольдса на модели увеличивается.

Обратимся теперь к вопросу моделирования твердого расхода и времени деформации русла при условии  $\frac{u}{u_0} = idem$ . По В. Н. Гончарову [9], для определения удельного расхода донных наносов приемлема следующая зависимость:

$$q_{дон} = 2,08 \left(\frac{u}{u_0}\right)^3 \left(\frac{d_0}{H_{cp}}\right)^{0,1} (u - u_0) d_0. \quad (5)$$

Для определения неразрывающей скорости воспользуемся формулой В. С. Кнороза [10]:

$$u_0 = a \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda_R}} \cdot \sqrt{\rho' g d_0}, \quad (6)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от  $d_0$ ,  $\rho' = \frac{\rho_1}{\rho} - 1$ ;  $\frac{\rho_1}{\rho}$  — относительная плотность материала частиц.

Подставляя формулу (6) в выражение (5) и производя простейшие преобразования, получим

$$q_{\text{дон}} = D \cdot H_{\text{cp}}^{-0,1} \left( \frac{u}{u_0} \right)^3 \left( \frac{u}{u_0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{V \lambda_R}, \quad (7)$$

где  $D$  — величина, зависящая только от  $d_0$ . Отсюда вытекает выражение для масштаба расхода донных наносов  $M_d$  при условиях равенства среднего диаметра частиц в натуре и на модели

$$d_{\text{он}} = d_{\text{ом}} \text{ и } \frac{u}{u_0} = \text{idem}$$

$$M_d = M_H^{-0,1} \cdot M_\lambda^{-0,5}, \quad (8)$$

где  $M_H$  — масштаб глубин;  $M_H$  — масштаб коэффициента гидравлического трения.

Для определения масштаба коэффициента гидравлического трения можно воспользоваться известными формулами А. П. Зегжды. Однако при этом необходимо представить их в критериальной форме [11]. Для области автомодельной и переходной они будут иметь следующий вид:

$$\frac{1}{V \lambda_R} = 4 \lg \frac{H_{\text{cp}}}{d_k} + 4,25,$$

$$\frac{1}{V \lambda_R} = 4 \lg \frac{H_{\text{cp}}}{d_k} + 11,28 - 1,4 \cdot \lg \text{Ar}_k,$$

где  $\text{Ar}_k = \frac{g d_k^3}{\nu^2} \left( \frac{\rho_1}{\rho} - 1 \right)$  — критерий Архимеда.

Таким образом, искомый коэффициент гидравлического трения  $\lambda_R$  есть функция диаметра  $d_k$  и относительной шероховатости.

Расчеты показывают, что при  $M_H = 50 \div 100$ ,  $M_\lambda$  оказывается равным  $\frac{1}{2} \div \frac{1}{3}$ . Следовательно, в рассматриваемом методе рас-

ходы донных наносов на модели и в натуре оказываются сравнимыми ( $M_d \approx 1$ ). Мутность потока в соответствии с формулой (5) будет равна

$$\mu = \frac{q_{\text{дон}}}{q} = 2,08 \left( \frac{u}{u_0} \right)^3 \left( 1 - \frac{u_0}{u} \right) \left( \frac{d_0}{H_{\text{cp}}} \right)^{1,1}.$$



При условии  $\frac{u}{u_0} = \text{idem}$  и  $d_{\text{он}} = d_{\text{ом}}$  масштаб мутности выразится зависимостью

$$M_{\mu} = M_H^{-1.1},$$

т. е. мутность на модели возрастает приблизительно во столько раз, во сколько линейные размеры натуры больше размеров модели. В соответствии с этим можно найти масштаб времени деформации русла. Для этого определим время, в течение которого произойдет смыв материала, приходящегося в одной гряде на 1 пог. м.

В связи с тем, что предлагаемый метод моделирования предполагает обязательное подобие гряд, можно утверждать, что объем их пересчитывается с масштабным коэффициентом  $M_H^2$ . Отсюда масштаб времени деформации будет равен

$$M_t = \frac{M_H^2}{M_d} = M_H^{2.1} a M_{\lambda}^{0.5}.$$

Таким образом, масштаб времени деформаций равен линейному масштабу во второй степени. Например, при  $M_H = 50$ ,  $M_t = 2400$ , т. е. один час деформаций на модели соответствует приблизительно 100 суткам в натуре. Это обстоятельство дает возможность в короткие промежутки времени изучать на модели процессы, которые в натуре будут длиться годами.

В заключение остановимся на ограничениях, которые накладываются на моделирование по предлагаемой методике. Во-первых, соблюдение геометрического подобия гряд при условии  $\frac{u}{u_0} = \text{idem}$  может быть достигнуто только в том случае, если модельное и натурное русла сложены песками, средний диаметр которых не превышает  $0,5 \div 0,7$  мм. Во-вторых, требование ограничения числа Фруда ( $Fr \leq 0,2$ ) приводит к необходимости идти на строительство моделей с довольно большой глубиной, а условие  $\lambda \frac{B}{H_{\text{ср}}} = \text{idem}$  и  $\lambda = \text{idem}$  заставляет задавать плановый линейный масштаб таким же, как вертикальный. В-третьих, должен вестись строгий контроль за временем протекания процесса деформации русла и за подачей твердого расхода на начальный участок модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. Л., «Энергия», 1967, 234 с.
2. Лапшенков В. С. Основные положения методики моделирования русловых процессов в песчаных руслах. — «Труды САНИИРИ», 1970, вып. 120, с. 155—175.

3. Знаменская Н. С. Грядовое движение наносов. Л., Гидрометеиздат, 1968. 188 с.
4. Кнороз В. С. Влияние микрошероховатости русла на его гидравлическое сопротивление. — «Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» 1959, вып. 62, с. 75—96.
5. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. Л., Гидрометеиздат, 1974. 144 с.
6. Михалев М. А. Гидравлический расчет потоков с водоворотом. Л., «Энергия», 1971. 184 с.
7. Лятхер В. М., Прудовский А. М. Исследования открытых потоков на напорных моделях. М., «Энергия», 1971. 288 с.
8. Engelund F., Skovgaard O. On the origin of meandering and braiding in alluvial streams. «J. Fluid Mech.», 1973, v. 57, № 2, p. 289—302.
9. Гончаров В. Н. Движение наносов. Л.-М., ОНТИ, 1938. 312 с.
10. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие. — «Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 1958, вып. 59, с. 62—81.
11. Михалев М. А. Материалы по моделированию некоторых видов движения жидкости. — «Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 1975, вып. 108, с. 27—39.
12. Gordon H. Flammer, J. Paul Tullis. Free surface, velocity gradient flow past hemisphere. «J. of the hydraulics' division» (Proceedings of the American SCE), July, 1970, NY 7, p. 1485—1502.

## К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕПАДА УРОВНЕЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОПОР

Вопросами взаимодействия опор различного рода сооружений с набегающим потоком баротропной жидкости занимались многие исследователи, в частности уделялось внимание и вопросу определения перепада уровней свободной поверхности непосредственно у обтекаемых жидкостью тел [1 — 5].

Знание величины максимального перепада уровней  $\Delta z$ , определяемого как разность максимального возвышения уровня у опоры и невозмущенного опорой уровня (рис. 1), необходимо для назначения отметки низа верхнего строения мостов, эстакад при пропуске максимального расчетного расхода (рис. 2). «Наблюдения за проходом паводков на построенных мостах ... показали недостаточность нормативных рекомендаций по максимальному возвышению низа пролетных строений» [1].

Рекомендуемые различными авторами формулы по определению перепада уровней не учитывают таких величин, как относительная глубина и параметр кинетичности набегающего на сооружение потока [1, 2]. Имеющиеся в литературе данные по исследованию перепада уровней получены и обработаны, как правило, в зависимости от элементов потока в бытовых условиях (т. е. до возведения сооружения).

Цель данной работы состояла в получении расчетной формулы для определения величины перепада уровней у цилиндрических опор.

Экспериментальной установкой служил гидравлический лоток имеющий длину 9 м, высоту 0,7 м, ширину 0,48 м и нулевой уклон. Глубина невозмущенного опорой потока  $h_{\infty}$  изменялась от 6,9 см до 23 см; средние скорости  $v_{\infty}$  — от 14 см/с до 63 см/с. В опытах использовалась модель опоры цилиндрической формы поскольку цилиндр являет собой классический пример тел плохого обтекаемой формы, к каковым относятся опоры. Цилиндр имеет диаметр  $d = 23$  мм.

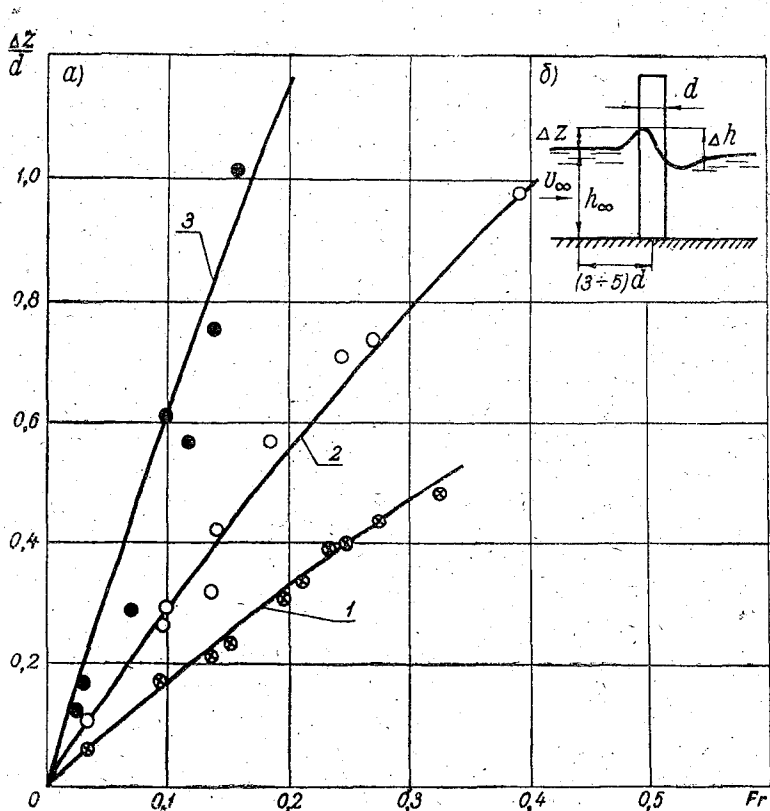


Рис. 1. Приведены зависимость относительного перепада уровней от числа Фруда и относительной глубины (а); схема условных обозначений (б):

1, 2, 3, — кривые для относительных глубин  $\frac{h_\infty}{d}$ , равных соответственно 3; 5; 10

Подобие явлений при обтекании опор открытым потоком несжимаемой жидкости, находящейся под действием сил тяжести, требует соблюдения условий однозначности и одинаковости чисел подобия, т. е.

$$Re = \frac{v_\infty d}{\nu} = \text{idem}; \quad Fr = \frac{v_\infty^2}{gh_\infty} = \text{idem}; \quad (1)$$

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho v_\infty^2} = \text{idem}; \quad Sh = \frac{d}{Tv_\infty} = \text{idem}$$

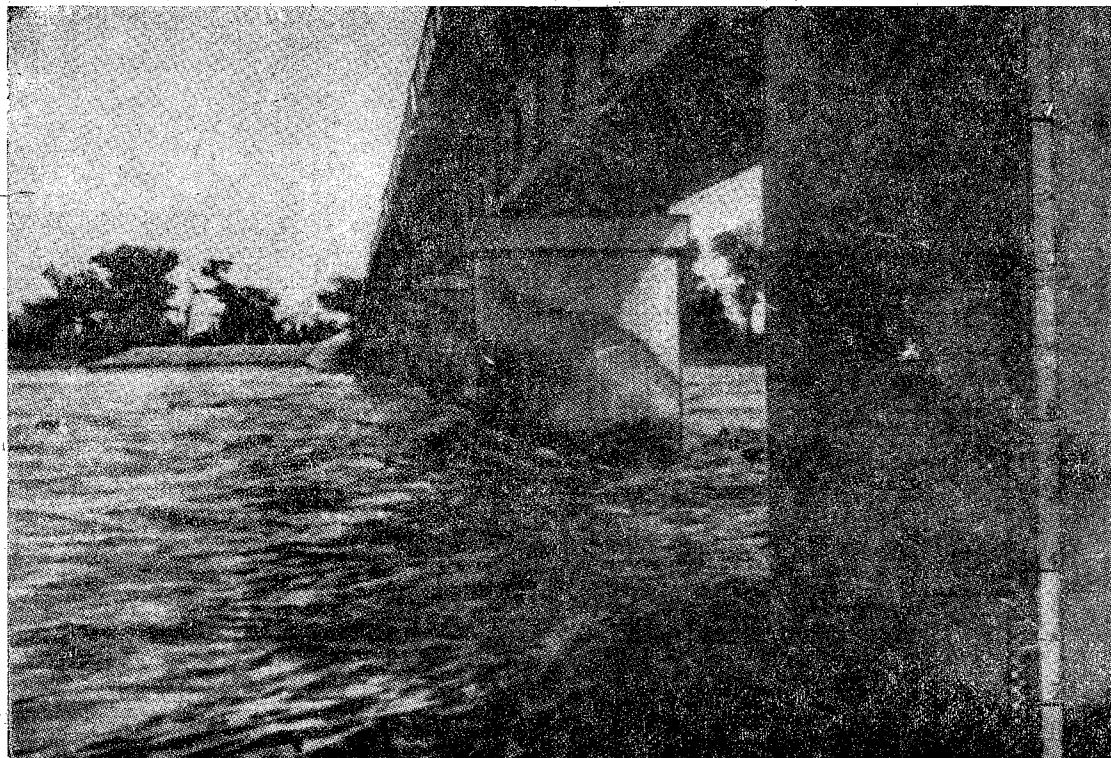


Рис. 2. Положение уровня у мостовых опор при прохождении паводка (рисунок заимствован из работы [1]).

В общем случае обтекания опор открытым потоком удовлетворить условиям однозначности — значит соблюсти равенство относительных глубин  $\frac{h_\infty}{d}$  модели и натуре, равенство коэффициентов застройки  $p$  и подобие иных геометрических форм модели и натуре (например, подходных условий, рельефа дна и т. п.). Из указанных в равенстве (1) чисел подобия число Фруда  $Fr$  и число Рейнольдса  $Re$  являются критериями подобия, так как содержат заданные наперед масштабы скоростей  $v_\infty$ , длин  $h_\infty$ ,  $d$  и физические константы  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $g$ .

Числа Эйлера  $Eu$  и Струхалия  $Sh$ , содержащие в своем составе неизвестные наперед соответственно перепад давления  $\Delta P$  и частоту срыва вихрей  $T$ , не могут быть критериями подобия и будут функциями чисел  $Fr$  и  $Re$ . Причем для чисел  $Re > 2 \cdot 10^3$  число Струхалия для цилиндрических абсолютно жестких тел сохраняет постоянное значение. В случае обтекания опор стационарным потоком задача эксперимента заключается в отыскании зависимости

$$Eu = f_1 \left( Fr; Re; \frac{h_\infty}{d}; p \right), \quad (2)$$

где  $p = \frac{d}{s+d}$  — коэффициент застройки, характеризующий меру стеснения потока опорами;  $s$  — расстояние «в свету» между опорами.

Поскольку перепад уровней  $\Delta z$  эквивалентен перепаду давления  $\Delta P$ , то перепад уровней необходимо искать из зависимости вида

$$Eu = \frac{\gamma \Delta z}{\rho v_\infty^2} = \frac{\Delta z}{v_\infty^2 / g} = f_1 \left( Fr; Re; \frac{h_\infty}{d}; p \right) \quad (3)$$

либо из зависимости вида

$$\frac{\Delta z}{d} = \frac{v_\infty^2 d}{g} \cdot f_1 \left( Fr; Re; \frac{h_\infty}{d}; p \right) = f_2 \left( Fr; Re; \frac{h_\infty}{d}; p \right) \quad (4)$$

(если  $\Delta z$  отнести к диаметру).

Эксперимент полностью оправдывает это заключение. Исследования проводились при различных значениях основных, определяющих явление параметров:  $Re = 4 \cdot 10^4 - 1,42 \cdot 10^5$ ;  $Fr = 0,027 - 0,40$ ;  $\frac{h_\infty}{d} = 3 - 10$ ;  $p \leq 0,19$ .

Опыты в открытом водном потоке, проведенные нами в автомодельной по числу Рейнольдса области, выявили зависимость характера обтекания опор [6, 7] и относительного перепада уровней  $\frac{\Delta z}{d}$  от параметра кинетичности и относительной глубины невозму-

щепного-опорами набегающего потока. На рис. 1 представлена полученная в опытах графическая зависимость относительного перепада уровней от параметров  $Fr$  и  $\frac{h_\infty}{d}$ . Исследования показали,

что при  $p \leq 0,19$  влияние коэффициента застройки на величину перепада пренебрежимо мало. Опыты подтвердили следующее известное равенство:  $\Delta h \simeq 2 \Delta z$ , где  $\Delta h$  — разность положений уровней перед опорами и за ними. Следует отметить, что подъем уровня перед опорой обусловлен образованием головной ударной волны и распространяется вверх по течению на расстояние, равное трем — пяти диаметрам опоры (считая от оси опоры). Причем, чем выше число Фруда и относительная глубина невозмущенного опорами потока, тем больше это расстояние.

Для определения относительного перепада уровней получена следующая эмпирическая зависимость:

$$\frac{\Delta z}{d} = 0,457 Fr^{0,90} \cdot \left( \frac{h_\infty}{d} \right)^{1,02} \quad (5)$$

Формула (5) справедлива для одиночной опоры в решетке с  $p \leq 0,19$  и при  $\frac{h_\infty}{d} = 3 - 10$ ;  $Fr = 0,027 - 0,40$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Болдаков Е. В. Проблемы мостовых переходов. М., «Транспорт», 1974, 215 с.
2. Ротенбург И. С. Вопросы гидравлического расчета и назначения отверстий мостов на переходах через равнинные реки. Изд-во Саратовского университета, 1960. 232 с.
3. Трасу Н. J. and Carter R. W. Backwater effects of open channel constructions. Proc. Am. Soc. of civil Engineers. V. 80, 1954, p. 102—117.
4. Мухамедов А. М., Абдураупов Р. Р. Некоторые результаты лабораторных исследований по регулированию потока и выправлению русла Аму-Дарьи системой сквозных шпор в районе Ташсакинского гидроузла. — «Труды САНИИРИ», Ташкент, 1970, вып. 120, с. 51—77.
5. Латышенков А. М. Вопросы гидравлики искусственно сжатых русел. М., Госстройиздат, 1960. 215 с.
6. Марченко А. С. Сопротивление цилиндрических тел типа опор при обтекании открытым водным потоком. — «Изв. ВНИИГ», 1975, т. 108, с. 48—54.
7. Марченко А. С. Некоторые особенности обтекания цилиндрических тел типа опор потоком со свободной поверхностью. ЛПИ, 1974 (депонирована в ВИНТИ 30 сент. 1974, № 2528 — 74 Деп.). 10 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЫВАЮЩИХ СКОРОСТЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ПОЧВ СТЕПНОГО ПРЕДКАВКАЗЬЯ

В условиях, когда большая часть южных районов Европейской части СССР распахана, приобретает особое практическое значение изучение противозерозионных свойств верхних почвенных горизонтов, подвергающихся ежегодно различного рода машинной обработке

Для воспроизведения естественных условий эрозионных процессов и факторов их определяющих широкое применение в последнее время нашло использование моделей в лабораторных условиях. Так, с помощью гидролотка моделируют не только водные потоки с различными параметрами, но и выясняют взаимосвязь потока с имитируемой подстилающей поверхностью.

Первые опыты по размыванию различных форм рельефа потоком были сделаны геоморфологами [1 — 3 и др.]. Однако они пользовались искусственно созданными насыпными моделями, что в значительной степени искажало естественные процессы. В. Б. Гуссак [4] впервые использовал почвенные монолиты для наблюдения за смывом в различных режимах искусственного дождя. При этом не учитывалась размывающая способность водного потока. Позднее В. Б. Гуссак [2], используя гидролоток, размывал почвенные образцы с ненарушенной структурой водным потоком при различных скоростях. Это позволило рассчитать среднюю интенсивность смыва за время опыта. Дальнейшим шагом в изучении факторов, влияющих на возникновение эрозии, послужил разработанный Ц. Е. Мирцхулавой [6] метод определения размывающих скоростей для связных грунтов. В результате работ Ц. Е. Мирцхулавы была получена зависимость, позволяющая рассчитать размывающую скорость при наличии некоторых параметров, отражающих как гидрологические особенности потока, так и свойства грунтов.

В целях выяснения противозерозионных свойств различных почв степного Предкавказья мы определили донные размывающие скорости верхних пахотных горизонтов этих почв. В работе был использован метод, разработанный М. С. Кузнецовым [7] применительно к почвенным монолитам. Опытная установка, на которой



проводился размыв, была изготовлена по типу гидрлотка, используемого на почвенном факультете МГУ (рис. 1).

Дно лотка выложено плексигласом. В сбросной части лотка установлена заслонка для регулирования глубины водного потока. На боковой стенке лотка имеется специальное приспособление для измерения высоты выступов шероховатости.

В дне лотка сделано отверстие размером 30 см  $\times$  15 см, в которое снизу вставляется кассета. Кассета состоит из рамки с монолитом, железной плиты, прижимающей монолит снизу, и рамы, крепящей всю кассету к стенкам лотка. Почвенный монолит может

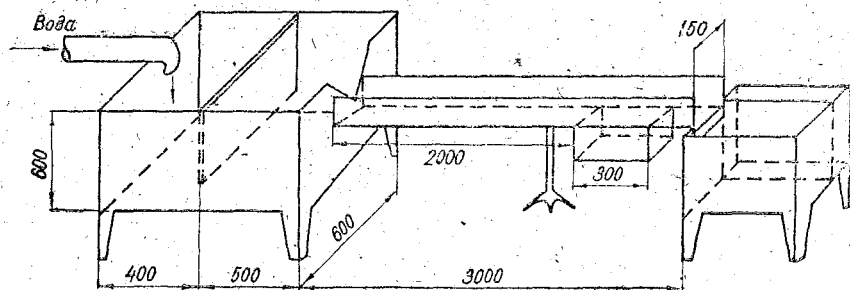


Рис. 1. Схема гидрлотка (размеры даны в мм).

выдвигаться над дном лотка. Для этой цели имеется пластина, по размерам совпадающая с внутренними размерами рамки. Эта пластина передвигается по стенкам монолитной рамки. Все стыковочные части кассеты имеют прокладки, обеспечивающие ее герметичность.

Основное условие при отборе монолита в поле заключается в сохранении естественного состояния самого верхнего почвенного горизонта. Отобранный монолит, тщательно упакованный, транспортируется в лабораторию. Затем производится подготовка монолита к размыву. Рамка с монолитом помещается в емкость, на дне которой наливается вода, так, чтобы она достигала нижней поверхности монолита. В течение суток, благодаря капиллярной всасывающей силе, происходит подъем воды по высоте монолита. После капиллярного насыщения емкость заливается водой до верхней грани и оставляется в зависимости от типа почв на три или четыре дня. За этот период почва достигает полной водовместимости. Такая подготовка монолита к работе на лотке необходима для сравнимости полученных результатов.

Для расчета средних скоростей потока строится тарифовочная кривая. Расход воды измеряется объемным способом в сбросной части лотка.

Подготовленный к размыву монолит устанавливается в дно лотка. Поверхность монолита выравнивается, а затем выдвигается над дном лотка примерно на 1,0—2,0 мм для создания шеро-

ховатости. Глубина потока при всех скоростях остается постоянной и составляет 2 см. Средняя скорость потока определялась по формуле:

$$v_{\text{ср}} = \frac{q}{s},$$

где  $q$  — расход воды, л/с;  $s$  — площадь поперечного сечения лотка,  $\text{м}^2$  (в нашем опыте величина постоянная и равна  $0,003 \text{ м}^2$ ).

Продолжительность воздействия потока на монолит составляла при каждой скорости один час. При выборе времени размыва мы руководствовались тем, что оптимальная продолжительность дождевых паводков, вызывающих эрозию в условиях степного Предкавказья, равна одному часу. В зависимости от целей исследований время размыва берется различное. Так, Ц. Е. Мирцхулава [6] и М. С. Кузнецов [7] размывали образцы по шесть часов при каждой скорости. Это объясняется тем, что при размыве грунтов или нижних генетических горизонтов почвы, как было при их исследованиях, происходит примерно на пятом—шестом часу размыва скачок в интенсивности смыва за счет расшатывания почвенных агрегатов, связанных силами сцепления. В пахотных же горизонтах межагрегатные связи ослаблены. Для сравнения результатов на нескольких монолитах мы проводили размыв одного и того же образца шесть часов и один час при каждой скорости. Близость полученных данных позволила нам в дальнейшем ограничиться временем размыва в один час.

Смытый материал собирался в отстойниках и затем взвешивался. Нарращивание средних скоростей проводилось на 2—3 см/с. На каждом монолите размыв определялся при 8—10 скоростях.

Для расчета размывающих скоростей исследовалась зависимость средней интенсивности смыва  $q$  от соответствующей ей средней скорости водного потока  $v_{\text{ср}}$ . Если построить график связи этих двух величин, то получим кривые параболического вида (рис. 2). По ним определить среднюю размывающую скорость затруднительно. Поэтому по результатам опыта подбиралось уравнение вида

$$q = a(v_{\text{ср}} - v_0)^n + q_0,$$

где  $v_0$  — наименьшая из исследованных скоростей потока, м/с;  $q_0$  — наименьшая средняя интенсивность смыва, г/см<sup>2</sup>·мин.

Затем обе части этого уравнения логарифмируем и строим график по новым переменным. Все точки будут ложиться на две пересекающиеся прямые, которым соответствуют два участка параболы. Пересечение прямых показывает точку перехода параболы второго или меньшего порядка к параболе более высокого порядка и ее следует принять за среднюю размывающуюся скорость. Далее,

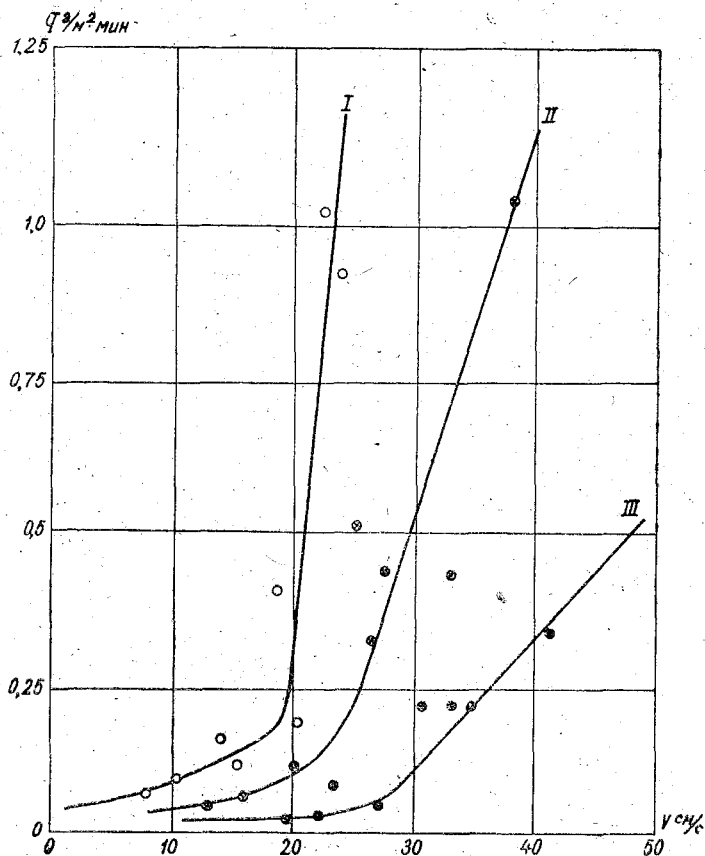


Рис. 2. Связь интенсивности смыва со средней скоростью:

I — каштановые почвы; II — темнокаштановые почвы; III — предкавказский чернозем слабосолонцеватый

используя логарифмическую зависимость В. Н. Гончарова [8], переходим к определению донной размывающей скорости:

$$v_{\Delta p} = \frac{1,25 v_{\text{ср}}}{\lg \frac{6,15 H}{\Delta}},$$

где  $v_{\Delta p}$  — донная размывающая скорость, см/с;  $v_{\text{ср}}$  — средняя размывающая скорость, см/с;  $H$  — глубина потока (2 см);  $\Delta$  — высота выступов шероховатости, см.

Измерение высоты выступов шероховатости с помощью шпигельмасштаба производилось через каждые 3 мм по трем продольным профилям и затем рассчитывалась их средняя величина.

Определение размывающих скоростей проводилось на пяти монолитах, отобранных в различных районах степного Предкавказья. Выбранные участки отличаются как по климатическим показателям, так и в почвенном отношении. В период отбора образцов поля были свободны от сельскохозяйственных культур.

Следует отметить, что при отборе монолита на каштановых почвах нам не удалось взять верхний пахотный горизонт. Поэтому размыву подвергался монолит, отобранный с глубины 15—30 см, что отразилось на полученном значении  $v_{\Delta p}$ . Основные показатели химических и физических свойств почв, а также данные по результатам опыта сведены в таблицу.

Как известно, химические свойства почв оказывают влияние на их противозерозионную устойчивость. По данным таблицы видно, что содержание органического вещества и поглощенных оснований в различных почвах значительно отличается. Наблюдается увеличение этих показателей для черноземного типа почв, в то время как в каштановых почвах величина гумуса и поглощенных оснований резко падает.

Различия в химических свойствах почв отразились на значениях размывающих скоростей, полученных нами экспериментально. Наименьшее значение  $v_{\Delta p}$  на темнокаштановом типе почв. Для каштановых почв  $v_{\Delta p}$  оказалось выше, хотя по всем показателям их противозерозионная устойчивость должна иметь наименьшее значение. Такое несоответствие связано с тем, что, как отмечалось выше, размыву подвергался в данном случае не самый верхний пахотный горизонт, а подпахотный слой, обладающий определенной структурностью.

Диапазон донных размывающих скоростей для различных почв небольшой, несмотря на значительные различия изучаемых почв по отдельным показателям. Это, по-видимому, объясняется тем, что испытуемые образцы взяты из пахотных горизонтов и влияние химических свойств на их противозерозионную устойчивость сказывается не столь резко, хотя определенная закономерность в распределении скоростей и наблюдается.

Мы попытались установить зависимости между различными показателями, определяющими противозерозионную устойчивость почв. Наилучшая связь наблюдается между химическими свойствами почв и средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов  $\bar{d}$  (рис. 3). За исключением типичного чернозема, содержание гумуса и поглощенных оснований всех почв коррелируют с показателем  $\bar{d}$  (коэффициент корреляции  $\approx 0,9$ ). Отсюда становится очевидным влияние химических свойств почвы на значение  $v_{\Delta p}$ . Это

№ п/п	Место отбора монолита	Тип почвы	Гумус (a), %	Сумма поглощенных оснований, мг-экв. на 100 г почвы	Поглощенный Са <sup>2+</sup> , мг-экв. на 100 г почвы	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов (d), см	Средняя высота выступов шероховатости (Δ), см	v д <sup>0,5</sup> см/с	
										определенная экспериментально	рассчитанная по формуле (1)
1	ст. Темнолесская	Предкавказский чернозем слабосолонцеватый	6,94	44,11	37,80	0,98	2,53	0,18	0,18	14,8	16,4
2	с. Калиновка	Чернозем карбонатный среднесмытый	3,95	30,24	23,52	1,08	2,60	0,11	0,22	14,2	12,8
3	р. Татарка	Чернозем типичный	7,95	52,99	39,48	0,82	2,50	0,13	0,30	15,0	13,8
4	с. Олжаное	Темнокаштановые	3,17	26,88	21,00	1,00	2,52	0,09	0,07	8,0	11,3
5	с. Петропавловское	Каштановые	2,11	21,00	14,28	1,07	2,61	0,07	0,04	12,3	10,8

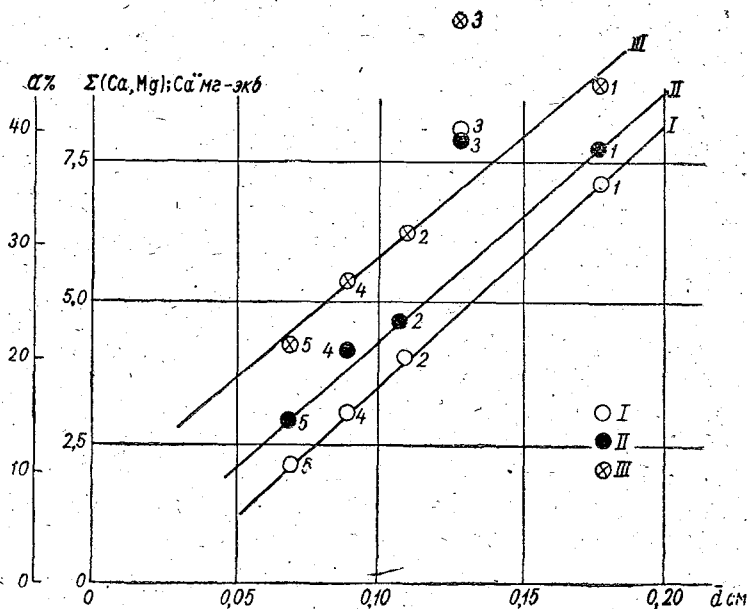


Рис. 3. Связь химических свойств различных почв со средне-взвешенным диаметром водопрочных агрегатов:

I — содержание гумуса (α); II — содержание поглощенного Ca<sup>++</sup>; III — сумма поглощенных оснований; 1 — предкавказский чернозем слабосолощиватый; 2 — чернозем карбонатный среднесыптый; 3 — чернозем типичный; 4 — темнокаштановые почвы; 5 — каштановые почвы

влияние в данном случае сказывается опосредованно через значение  $\bar{d}$ . Учитывая влияние  $\bar{d}$  на значение донной размывающей скорости, М. С. Кузнецов и В. Я. Григорьев [9] предложили формулу для расчета  $v_{\Delta p}$ .

$$v_{\Delta p} = 1,55 \sqrt{\frac{g}{n\gamma_0} \bar{d} (\gamma - \gamma_0) \left(1 - \frac{P}{100}\right)}, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $n$  — коэффициент перегрузки, характеризующей пульсацию скоростей в потоке (принято  $n=1,46$ );  $\bar{d}$  — средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов, определенный по методу Саввинова, см;  $\gamma$ ,  $\gamma_0$  — соответственно удельный вес твердой фазы почвы и воды;  $P$  — порозность агрегатов, %.

Значения  $v_{\Delta p}$ , рассчитанные по формуле (см. таблицу), довольно близки к значениям  $v_{\Delta p}$ , полученным экспериментально. Это подтверждает возможность использования вышеприведенной зависимости в расчетах различного рода противоэрозионных мероприятий, при проектировании которых необходимо учитывать скорости склоновых потоков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд Д. Л. Изучение геоморфологических процессов экспериментальным методом. — «Труды Ин-та географии АН СССР», 1950, т. X, с. 5—75.
2. Нефедьева Е. А., Хмелева А. В. Изучение эрозионных форм рельефа экспериментальным методом. — «Труды Ин-та географии АН СССР», 1956, № 68, с. 5—36.
3. Спиридонов А. И. Опыт изучения водной эрозии и денудации в лаборатории. — «Почвоведение», 1951, № 3, с. 167—173.
4. Гуссак В. Б. Экспериментальное изучение смывов почвы на красноземах влажных субтропиков Аджаристана. — «Почвоведение», 1935, № 1, с. 35—55.
5. Гуссак В. Б. Некоторые вопросы методики и техники лабораторных исследований эродированности почв. — «Почвоведение», 1950, № 5, с. 285—293.
6. Мирцхулава Ц. Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М., «Колос», 1970. 238 с.
7. Кузнецов М. С. К вопросу о методике исследования эродированности почв. — В кн.: Эрозия почв и русловые процессы, вып. 3. М., Изд-во МГУ, 1973, с. 126—133.
8. Гончаров В. Н. Основы динамики русловых потоков. Л., Гидрометеиздат, 1954. 451 с.
9. Григорьев В. Я., Кузнецов М. С. Картирование почв по противоэрозионной стойкости при оценке потенциальной опасности ирригационной эрозии. — В кн.: Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях. М., Изд-во МГУ, 1976, с. 121—123.

## К ВОПРОСУ О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ С ПОЙМАМИ

В связи с интенсивным водохозяйственным строительством, резко повысились требования к данным о максимальных расходах воды. Как известно, на равнинной части территории Союза последние, как правило, проходят при затопленной пойме. Их измерение сопряжено с рядом трудностей. Поэтому часто расходы воды либо не измеряются, либо измеряются только в русловой части потока [3]. Особенно остро стоит вопрос получения данных о максимальных расходах воды на малых реках. Методы их расчета основаны на формуле Шези, которая разработана для равномерного, установившегося режима потоков в руслах простых форм сечения.

В то же время установлено [1, 2], что в ряде случаев наблюдается существенное уменьшение пропускной способности руслового потока под влиянием пойменного потока, а также от взаимного влияния отдельных его составляющих при их слиянии, приводящее к тем же результатам.

Поэтому нами была предпринята попытка, на материалах наблюдений по четырем рекам Уральского УГМС (табл. 1), выявить влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на пропускную способность русел с поймами и его зависимость от их морфометрии.

По данным наблюдений, для всех четырех рек были построены кривые расходов воды и вспомогательные кривые отдельно для русловой и пойменной частей потока, а также суммарные для водотока в целом (рис. 1).

При этом значения коэффициента Шези  $C$  определялись по натурным данным по формуле  $C = \frac{v}{\sqrt{hI}}$ , а значения параметра  $n$

по формулам Павловского  $C = \frac{1}{n} h^y$  (до  $h < 5$  м) и Маннинга

$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}}$  (при  $h > 5$  м), где  $v$  — средняя скорость,  $h$  — средняя глубина,  $I$  — уклон свободной поверхности.



Сведения об изменении пропускной способности русловой части потока

Река, пункт, год	Количество измеренных расходов при свободном русле		Уменьшение пропускной способности русловой части потока под влиянием пойменного	
	русло	пойма	$\Delta Q_{\max}$ , м <sup>3</sup> /с	$\frac{\Delta Q_{\max}}{Q'_p} \cdot 100\%$ <sup>1</sup>
Сылва—Подкаменное, 1957 г.	23	6	110	5,7
Пышма—Сарапулка, 1973 г.	17	2	6,8	27,4
Черная—Сагра, 1973 г.	29	3	8,8	27,0
Лая—Малая Лая, 1946 г.	23	6	1,7	10,2

<sup>1</sup> В табл. 1  $\Delta Q_{\max}$  — наибольшее уменьшение пропускной способности русловой части потока под влиянием пойменного, полученное как разность расходов воды, снятых с фактической и экстраполированной частей кривых расходов при уровне, соответствующему наибольшему уменьшению расхода воды;  $Q'_p$  — расход воды при этом же уровне, снятий с экстраполированного отрезка кривой для русловой части потока.

Как видно на рис. 1, по реке Сылва—Подкаменное, приведенной в качестве примера, а также и по остальным рекам, кривые зависимости  $Q_p=f(H)$  и  $v_p=f(H)$  при уровнях ниже уровней выхода воды на пойму аналогичны соответствующим кривым, но для беспойменных русел. В то же время для русловой части потока при уровнях, превышающих уровни выхода воды на пойму, отмечается существенное отклонение натуральных данных влево от соответствующих кривых, полученных методом линейной экстраполяции, т. е. наблюдается перелом кривых в зоне уровней соответствующих выходу воды на пойму. Аналогичное уменьшение пропускной способности русла, обусловленное влиянием пойменного потока на русловой наблюдается на всех исследованных реках и, как видно из табл. 1, достигает на реке Пышма — п. Сарапулка — 27,4%.

Изменение коэффициента Шези  $S$  с глубиной для русловой части потока определяется в основном характером изменения скоростей и уклонов свободной поверхности и характеризуется уменьшением значений коэффициента Шези  $S$  при выходе воды на пойму (рис. 1).

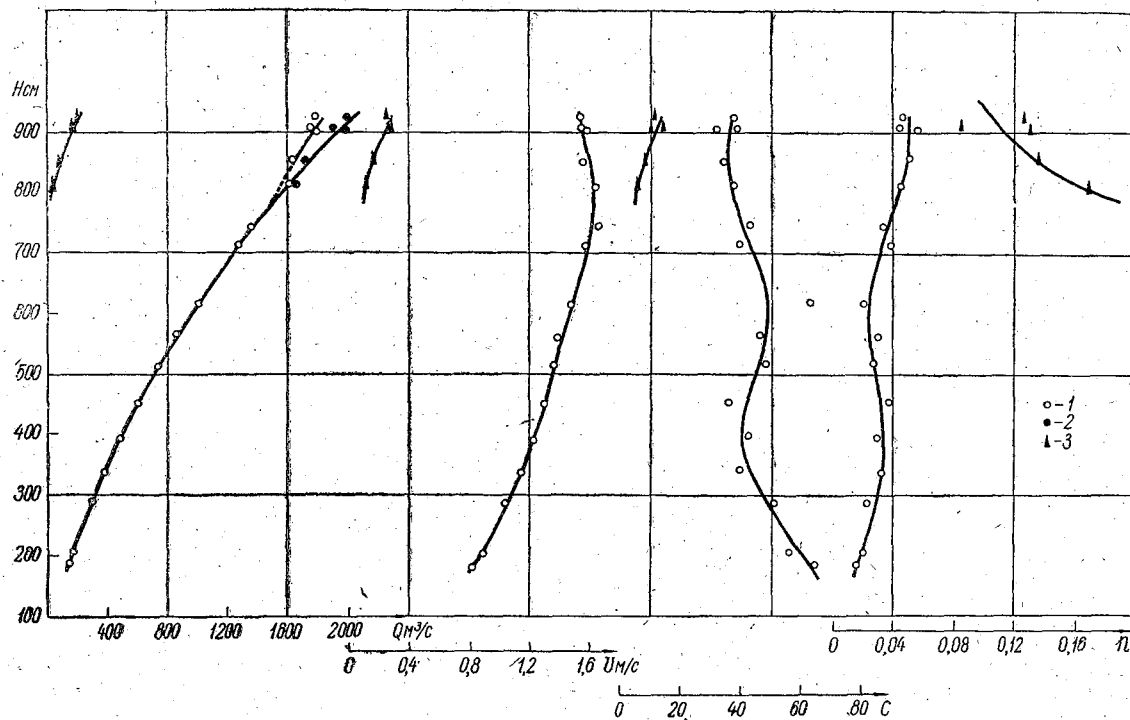


Рис. 1. Кривые зависимостей  $Q=f(H)$ ,  $v_p=f(H)$ ,  $C_p=f(H)$ ,  $n_p=f(H)$  и  $n_{п}=f(H)$  по р. Сылта-Подкаменное за 1957 г.:

1 — русловая часть потока; 2 — суммарные для русла с поймой; 3 — пойменная часть потока

Гидравлические сопротивления  $n$ , как известно, обратны значениям  $C$ , поэтому кривые  $n_p = f(H)$  являются зеркальными отображениями кривых  $C_p = f(H)$  (рис. 1).

Для дальнейшего анализа были построены зависимости

$$\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H'), \quad \frac{n_{п.}}{n_{п.б}} = f(H') \quad \text{и} \quad \frac{I_p}{I_{п.б}} = f(H'), \quad \text{где}$$

$n_p, n_{п.б}$  — соответственно гидравлические сопротивления для русловой части потока и то же, но при уровнях затопления бровки прируслового вала;  $n_{п.}$  — гидравлическое сопротивление пойменной части потока;  $H'$  — уровни воды, отсчитываемые от бровки прирусловых валов.

При слиянии руслового и пойменного потоков, на всех исследуемых реках наблюдается существенное увеличение значений

$\frac{n_p}{n_{п.б}}$  с ростом уровней (рис. 2). Так, для реки Пышма — Сарапулка эти значения увеличиваются в 1,6 раза. Для реки Сытва —

Подкаменное сначала наблюдается рост значений  $\frac{n_p}{n_{п.б}}$  до величины 1,25, затем их стабилизация, переходящая в незначительное

уменьшение данного параметра. Каждая кривая  $\frac{n_p}{n_{п.б}} = f(H')$

в какой-то мере индивидуальна. Вид кривой, в первую очередь, обусловлен морфометрией русла и поймы и их изменением по длине потока, а также соотношением их сопротивлений и другими характеристиками.

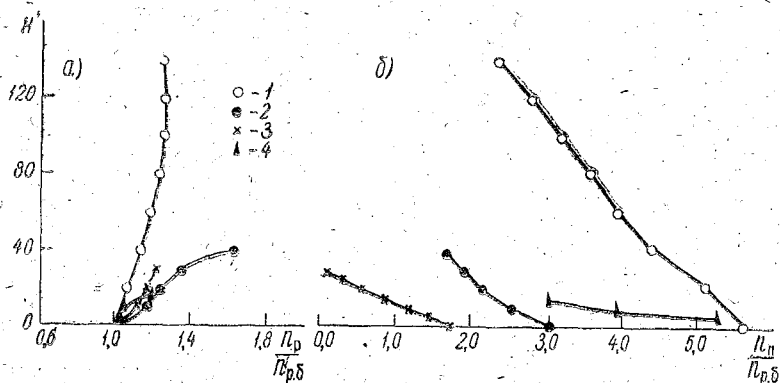


Рис. 2. Кривые зависимости:

а —  $\frac{n_p}{n_{п.б}} = f(H')$ ; б —  $\frac{n_{п.}}{n_{п.б}} = f(H')$ ; 1 — р. Сытва-Подкаменное; 2 — р. Пышма-Сарапулка; 3 — р. Лая-Малая Лая; 4 — р. Черная-Сагра.

Однако имеющиеся в распоряжении автора планы участков постов, которые по длине обычно равны пятикратной ширине меженного русла, не дают возможности установить количественные

показатели зависимости вида кривых  $\frac{n_p}{n_{p.б}} = f(H')$  от морфометрических характеристик русла и поймы.

Рассмотрим характер изменения гидравлических сопротивлений поймы с глубиной. Как видно на рис. 2 б, значения  $\frac{n_p}{n_{p.б}}$  резко убывают с глубиной. Так, для реки Сылва — Подкаменное диапазон изменения  $\frac{n_p}{n_{p.б}}$  от 5,58 до 2,37, а для реки Лая — Малая Лая от 1,79 до 0,33. Это объясняется тем, что при расчете величин  $n_p$  по формуле  $n_p = \frac{h^y}{C}$ , значения глубин, как правило, завышены за счет бессточных водоемов и емкостей. Причем это влияние с ростом уровней уменьшается.

Сравнение расчетных значений параметров  $n$  с табличными показывает, что для русловой части потока они близки между собой, но при уровнях, превышающих уровни затопления поймы отмечаются существенные отклонения, обусловленные недоучетом кинематического эффекта.

Следует отметить, что при оценке значений коэффициентов шероховатости  $n_{расч}$  и  $n_{табл}$  встречается ряд трудностей, основная из которых заключается в отсутствии в таблицах полного описания участка. Основной характеристикой большинства таблиц, как правило является растительность. В то же время известно, что характер растительности, а значит и ее сопротивление весьма значительно изменяются в зависимости от погодных условий и других причин как в течение года, так и в различные годы. В таблицах также недостаточно учитываются пересеченность рельефа, распаханность, глубина затопления поймы и другие характеристики.

Наихудшие результаты сравнения фактических и табличных данных получены для пойменных отсеков потоков. Эти расхождения, в первую очередь, обусловлены недоучетом влияния глубин на сопротивление поймы, а также, по-видимому, недостаточностью информации, положенной в основу таблиц. Как видно из табл. 2, расхождения достигают 300—400% и более.

Выполненный анализ и расчеты позволяют сделать вывод о тесной взаимосвязи между гидравликой потока и его морфометрией, особенно резко проявляющейся при движении транзитного потока по пойме.

Расчетные и табличные значения гидравлического сопротивления пойм

Река, пост	Диапазон изменения средних глубин на пойме	Значения $n_{п}$			
		фактические	по М. Ф. Срибному	по Л. Л. Лиштвану	по В. Т. Чоу
Сылва—Подкаменное	1,20—2,24	0,08—0,21	0,08	0,07—0,110	0,025—0,035
Пышма—Сарапулка	0,31—0,46	0,06—0,07	0,08	0,04—0,07	0,025—0,035
Черная—Сагра	0,27—0,35	0,03—0,09	0,65	0,04—0,07	0,035—0,07
Лая—Малая Лая	0,05—0,19	0,01—0,03	0,05	0,07—0,11	0,030—0,050

Таблицы для определения гидравлического сопротивления (Срибного, Лиштвана, Чоу, Брэдли и др.) недоучитывают этого, а также эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков. Именно поэтому наибольшее расхождение фактических и расчетных данных как для русла, так и для поймы отмечается при уровнях, превышающих уровни затопления поймы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Железняков Г. В. Теория гидрометрии. Л., Гидрометеиздат, 1976. 434 с.
2. Скородумов Д. Е. Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды. — «Труды ГГИ», 1965, вып. 128, с. 3—96.
3. Урываев П. А., Лыло В. М. Методические ошибки в изучении гидравлического режима рек Дальнего Востока. УГМС ДВ. Информ. письмо № 3(31), Хабаровск, 1963, с. 34—40.

Г. Н. УГРЕНИНОВ, Ю. А. КУЗЬМИН, А. П. МОРОЗОВ (ЛГМИ)

## О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИН И РАСЧЕТОВ ПЛОЩАДЕЙ ВОДНОГО СЕЧЕНИЯ

Рекомендации по оценке точности гидрометрических измерений [1, 2] обычно не позволяют оценить всего многообразия условий производства работ. Проведенный кафедрой гидрометрии ЛГМИ в июле 1976 г. эксперимент на ручье Горском (левый приток р. Луги в районе г. Кингисеппа) дает дополнительный материал, в частности, для определения погрешностей измерения глубин и расчетов площадей водного сечения на малом водотоке.

Морфометрические характеристики ручья Горского таковы: площадь водного сечения  $\omega = 1,19 \text{ м}^2$ , ширина  $B = 4,25 \text{ м}$ ; глубина  $h_{\text{ср}} = 0,28 \text{ м}$ . Русло имеет правильную трапецеидальную форму. Заиленность русла незначительная. Средняя скорость течения в период производства работ составила  $v_{\text{ср}} = 0,30 \text{ м/с}$ .

Эксперимент заключался в повторении промеров глубин при одном и том же уровне воды. Всего выполнено 50 промеров. Измерения осуществлялись металлической штангой с гидрометрического мостика.

При статистическом анализе результатов эксперимента было обнаружено практическое отсутствие зависимости погрешностей измерений от средних глубин на промерных вертикалях. Значение стандартной ошибки измерений глубин на вертикалях составило  $\sigma_h \approx 0,01 \text{ м}$ .

По данным промеров вычислялись площади водного сечения. Вариацию площадей  $\omega$  характеризует стандартное отклонение  $\sigma_{\omega} \approx 0,02 \text{ м}^2$ , полученное по результатам 50 промеров.

В дополнение к обычной статистической обработке экспериментального материала, была произведена попытка вычислить стандартную ошибку определения площадей водного сечения непосредственно по данным о погрешностях измерений глубин. Согласно [1], при таком расчете следует также принимать во внимание погрешности определения расстояний между промерными вертикалями. Однако, ввиду того, что местоположение вертикалей закреплено на мостике специальной разметкой, целесообразно учитывать лишь неточности измерения расстояний от урезов до прибрежных вертикалей.

В книге [1] авторы предлагают выражение для расчета предельной ошибки определения площадей  $\omega$ . Очевидно, стандартное отклонение  $\sigma_{\omega}$  включает в себе более полную информацию о вариации погрешностей  $\Delta\omega$ , чем предельная ошибка. В основу пред-

лагаемой схемы расчета значения  $\sigma_\omega$  положена математическая модель вычисления дисперсии функции  $f(X_1, X_2, \dots, X_n)$  [3]:

$$Df(X_1, X_2, \dots, X_n) \approx \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)_v^2 DX_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)_v^2 DX_2 + \dots \\ \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right)_v^2 DX_n + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)_v \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)_v \text{cov}(X_1, X_2) + \dots \\ \dots + 2 \left(\frac{\partial f}{\partial X_{n-1}}\right)_v \left(\frac{\partial f}{\partial X_n}\right)_v \text{cov}(X_{n-1}, X_n), \quad (1)$$

где индекс  $v$  обозначает, что в выражения частных производных вместо величин  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , следует при расчетах подставлять значения математических ожиданий  $MX_1, MX_2, \dots, MX_n$ .

Основное условие применимости схемы (1) — небольшие коэффициенты вариации составляющих аргумента — обычно выполняется при оценке погрешностей измерений глубин на малых реках.

Ранее было оговорено, что в качестве переменных составляющих аргумента приняты величины глубин  $h_i$  и расстояний  $b_1$  и  $b_{n+1}$ . Тогда, дисперсия погрешностей определения площади  $\omega$  равна

$$\sigma_\omega^2 \approx \frac{\bar{h}_1^2}{4} \sigma_{b_1}^2 + \frac{\bar{h}_n^2}{4} \sigma_{b_{n+1}}^2 + \frac{(\bar{b}_1 + \bar{b}_2)^2}{4} \sigma_{h_1}^2 + \frac{(b_2 + b_3)^2}{4} \sigma_{h_2}^2 + \dots \\ \dots + \frac{(b_{n-1} + b_n)^2}{4} \sigma_{h_{n-1}}^2 + \frac{(b_n + \bar{b}_{n+1})^2}{4} \sigma_{h_n}^2 + \\ + \frac{(\bar{b}_1 + b_2)(b_2 + b_3)}{2} \text{cov}(h_1, h_2) + \dots \\ \dots + \frac{(b_{n-1} + b_n)(b_n + \bar{b}_{n+1})}{2} \text{cov}(h_{n-1}, h_n). \quad (2)$$

Стандартная погрешность измерения расстояний  $b_1$  и  $b_{n+1}$  по данным эксперимента составляет  $\sigma_b \approx 0,015$  м. Ограничившись использованием значений двух стандартных погрешностей  $\sigma_h$  и  $\sigma_b$ , можно представить выражение (2) в виде:

$$\sigma_\omega^2 \approx \frac{\bar{h}_1^2 + \bar{h}_n^2}{4} \sigma_b^2 + \\ + \frac{(\bar{b}_1 + b_2)^2 + (b_2 + b_3)^2 + \dots + (b_{n-1} + b_n)^2 + (b_n + \bar{b}_{n+1})^2}{4} \sigma_h^2 + \\ + \frac{(\bar{b}_1 + b_2)(b_2 + b_3)}{2} \text{cov}(h_1, h_2) + \dots \\ \dots + \frac{(b_{n-1} + b_n)(b_n + \bar{b}_{n+1})}{2} \text{cov}(h_{n-1}, h_n). \quad (3)$$

Вычисленная по формуле (3) оценка стандартной погрешности определения площади водного сечения близка к эмпирическому значению  $\sigma_{\omega}$ . Следует отметить, что при условии независимости погрешностей измерений глубин, когда  $\text{cov}(h_1, h_2) = \text{cov}(h_1, h_3) = \dots = \text{cov}(h_{n-1}, h_n) = 0$ , расчеты по формуле (3) приводят к явно уменьшенному значению стандартной погрешности:  $\sigma_{\omega} \approx 0,01 \text{ м}^2$ .

В статье рассмотрен частный случай. Однако на основании анализа экспериментальных данных можно составить предварительное суждение о том, что, во-первых, в сходных условиях стандартные погрешности  $\sigma_h$  мало зависят от значений глубин на промерных вертикалях; во-вторых, недопустим расчет погрешностей вычисления площадей водного сечения по формулам типа (2), (3) без учета взаимной зависимости ошибок измерений глубин на различных вертикалях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железняков Г. В., Данилевич Б. Б. Точность гидрологических измерений и расчетов. Л., Гидрометеиздат, 1966. 240 с.
2. Наблюдения на гидрометеорологической сети СССР. Л., Гидрометеиздат, 1970. 90 с.
3. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., «Наука», 1969. 511 с.



## О РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ ПРИТОКОВ ОЗЕРА СЕВАН

Бассейн озера Севан представляет собой огромную тектоническую впадину. Она ограничена с запада Гегамским массивом, с юга — Варденисским хребтом, а с северо-запада и востока — Арегунийским и Севанским хребтами. Высота этих хребтов колеблется от 2400 до 2600 м (отдельные вершины) над уровнем Балтийского моря. Средняя высота водосборной площади озера составляет 2390 м, величина этой площади — 4890 км<sup>2</sup>, а площадь зеркала — 1260 км<sup>2</sup> (на 1.1.1976 г.).

Величины основных компонентов водного баланса озера за 1975 г. составили: осадки — 451 млн. м<sup>3</sup>, испарение — 1055 млн. м<sup>3</sup>, поверхностный и подземный приток воды — 786 млн. м<sup>3</sup>, отток подземных вод — 6 млн. м<sup>3</sup> и уменьшение объема воды в озере — 325 млн. м<sup>3</sup>. Таким образом, основная часть воды, поступающей в озеро, испаряется.

В озеро Севан впадают 28 рек и речек, а берет начало только одна река — Раздан.

С 1936 г. для выработки электроэнергии Канакерской ГЭС стали использовать воду озера. С этого времени началось искусственное понижение уровня воды в нем. Однако интенсивного падения, обусловленного резким увеличением попусков из верхних запасов воды озера, началось в 1949 г. в связи с пуском в эксплуатацию Севанской подземной ГЭС. В 1953 г. была введена в эксплуатацию Гюмушская ГЭС, в 1956 г. — Арзнинская в 1959 г. — Атарбекянская и в 1962 г. — Ереванская.

Ежегодные попуски воды из озера как для выработки электроэнергии шести гидроэлектростанций, так и для орошения Араратской долины привели к снижению его уровня на 17,5 м, в связи с чем в устьевых участках притоков Севана существенное развитие получили необратимые русловые процессы, выразившиеся в необратимых размывах или намывах [1].

Анализом исходных материалов установлено, что характер интенсивности деформаций на разных реках бассейна и даже на различных участках рек существенно отличны (в зависимости от режима, геологического строения речных бассейнов, гранулометрического состава грунта и ряда других факторов).

Берега осушенной части озера, как правило, имеют уклоны большие, чем уклоны рек в их устьевых участках (в естественных условиях). В то же время иногда наблюдается обратное явление, т. е. уклоны рек больше или примерно равны уклону берега озера. Это разнообразие приводит к различным по характеру и интенсивности русловым деформациям притоков озера Севан.

Приведем некоторые количественные показатели русловых деформаций.

В течение 1950—1970 гг. русло реки Дзыкнагет на двухкилометровом участке смещено в плане на 350—400 м; только в августе 1960 г. это смещение составило 20 м, в марте 1964 г. — 15 м, в мае 1965 г. — 20 м, а в апреле 1968 г. — 18 м.

Нами установлено, что на ряде гидрометрических створов, в частности в створе Цовагиух в течение года происходят существенные деформации. В связи с этим гидрометрические работы и учет стока в этих створах крайне затруднены. Гидрометрические сооружения (переправы, лимниграфы, рейки и др.) из-за деформаций часто выходят из строя и не дают возможности проводить измерения стока и других характеристик на них. Деформации на реке Дзыкнагет особенно велики в ее устьевой части ввиду наличия легкоразмываемых отложений и понижения уровня, а также из-за значительного уклона берегов осушенной части озера.

Вверх по течению деформации размыва затухают. Их интенсивность обусловлена наличием естественных и искусственных препятствий.

Результаты исследований на реке Дзыкнагет у с. Цовагиух за 1944—1975 гг. показали, что деформации размыва на рассматриваемом участке составляют 4 м, притом наиболее интенсивное углубление русла наблюдалось после 1961 г. Причиной этого явились большие заборы воды из озера в течение предшествовавших периодов, обусловившие резкое снижение уровня, а следовательно, и базиса эрозии. Врезание русла только за 1963—1968 гг. составило 3,4 м. Начиная с 1948 г. по 1955 г. преобладал процесс глубинного размыва, а с 1955 г. по 1961 г. — аккумуляция наносов, которая привела к почти полному восстановлению предшествующих этому периоду отметок дна.

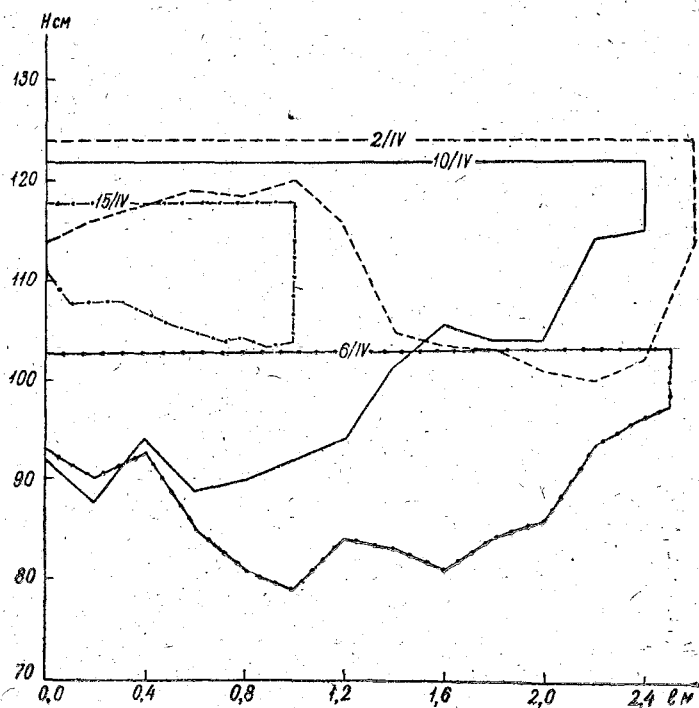
Как видно из таблицы, где приведены внутригодовое распределение величин площадей общей деформации и их относительные значения в процентах, интенсивность деформаций в течение года тоже различна.

Внутригодовое распределение величин русловых деформаций  
р. Дзыкнагет — с. Цовагиух за период 1944—1975 гг.

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего
площадь деформации, м <sup>2</sup>	5,2	6,0	9,8	68,6	62,2	25,5	13,1	4,8	3,9	3,0	1,4	2,6	206
относительное значение площади деформации, %	2,5	2,9	4,8	33,2	30,1	12,4	6,4	2,3	1,9	1,5	0,7	1,3	100

Деформации размыва часто приводят к разрушению гидротехнических сооружений.

Так, на реке Карцахпюр во время половодья 1974 г. были подмыты опоры моста и разрушено крепление порога под мостом. Мост являлся промежуточным базисом эрозии, и после его разрушения процесс глубинной эрозии переместился вверх по течению. Глубина размыва у с. Карцахпюр местами составила 2—3 м.



Совмещенные профили поперечного сечения русла р. Памбак у с. Памбак за 1963 г.

После прохождения больших паводков русло реки Памба у с. Памбак смещалось на 20—30 м. Величины глубинной деформации в отдельные дни достигают до 0,5—0,6 м (см. рисунок).

На реках Тохлуджа, Дара, Шишкая происходит перемещение русла в плане до 200 м, а величина глубинного размыва во время половодья составляет 0,5—1 м.

В последние годы наблюдается интенсивный размыв берегов и русел рек Алучалу, Варденис, Мартуни, Бахтак, Шохва Арцванист. Если в предыдущие годы размывы наблюдали только в предустьевых участках, то в настоящее время они происходят на значительных расстояниях от озера (5—10 км).

Интенсивное перестроение русла и берегов наблюдается на реке Мартуни. В 1957, 1963, 1968 гг. величина глубинного размыва составила 0,70—1,0 м, а перемещение в плане — 40—60 м. Здесь характерны образования островов и рукавов.

На предустьевых участках реки Гаварагет величины глубинной деформации достигают трех метров.

Все эти примеры позволяют сделать вывод о том, что изучение и научно обоснованные прогнозы русловых процессов на притоках озера Севан дадут возможность ответить на ряд запросов практики, которые в настоящее время возникают из-за ущерба, причиняющегося народному хозяйству (разрушение мостов, смыв культурных насаждений и т. п.), в связи с недоучетом русловых процессов. В ближайшие годы намечается строительство автомобильной и железной дорог вокруг озера, которые будут проходить по устьевым участкам рек, а следовательно, и строительство многочисленных мостов на этих участках.

Однако исследование русловых процессов на притоках озера осложняется большими колебаниями уровней озера, вызванными неравномерными попусками воды из него для орошения и энергетики.

Наличие многочисленных факторов, влияющих на русловый процесс требует для его изучения комплексного (теоретического, экспериментального и натурного) исследования. Только в совокупности этих исследований можно качественно и количественно оценить современное и перспективное положение русел в данном районе. Именно для этих целей необходимо в ближайшее время на базе Севанской гидрометобсерватории открыть специализированную русловую станцию для комплексного изучения русловых процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

Русловой процесс. Под. ред. Н. Е. Кондратьева. Л., Гидрометеониздат, 1959, 371 с.

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ УВЛАЖНЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ СОЮЗА В ВЕГЕТАЦИОННЫЙ ПЕРИОД

В последнее время большое внимание уделяется изучению климатических и агроклиматических особенностей нечерноземной зоны ЕТС как одному из важнейших сельскохозяйственных районов, ресурсные возможности которого использовались неполно. При определении планов дальнейшего развития сельского хозяйства этой зоны большое значение имеет рациональное использование климатических условий. В целом климатические условия нечерноземной зоны, в том числе и увлажнение, принято считать благоприятными для развития большинства сельскохозяйственных культур умеренного пояса. Однако в отдельные годы здесь могут наблюдаться значительные аномалии увлажнения, которые вызывают снижение урожая сельскохозяйственных культур. Исследованию возможных колебаний увлажнения названного района и предложена предлагаемая работа.

Центральные области нечерноземной зоны ЕТС занимают центральную часть Восточно-Европейской равнины. Имеющиеся на территории возвышенности не превышают 340 м. Над данной территорией преобладает западно-восточный перенос воздушных масс, которым объясняется увеличение континентальности климата с запада на восток. Это обстоятельство проявляется в характере погоды.

В качестве характеристики увлажнения территории в отдельные годы в работе принят коэффициент увлажнения, который представляет собой отношение суммы осадков ( $r$ ) к испаряемости за тот же период времени ( $E_0$ ).

В данной работе использовался коэффициент увлажнения предложенный Н. Н. Ивановым [2], который можно записать в виде:

$$k = \frac{r}{E_0},$$

где  $k$  — коэффициент увлажнения.

Испаряемость ( $E_0$ ) определена по формуле Н. Н. Иванова [2]:

$$E_0 = 0,0018 (25 + t)^2 (100 - f), \quad (2)$$

где  $E_0$  — испаряемость (мм/мес),

$t$  — средняя месячная температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$f$  — средняя месячная относительная влажность воздуха (%).

Как было показано ранее, в условиях климатов умеренных широт метод Н. Н. Иванова позволяет вычислять испаряемость с ошибкой, не превышающей погрешность вычисления этой характеристики более физически обоснованными методами [1].

Метод Н. Н. Иванова из-за своей простоты более удобен для расчетов испаряемости за большие ряды лет.

В работе использовались материалы наблюдений на 25 станциях нечерноземной зоны ЕТС за двадцатилетний период (1953—1972 гг.). Средний многолетний коэффициент увлажнения, его значения за отдельные годы, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации рассчитывались для каждого месяца вегетационного периода (май — август). Результаты расчетов приведены в таблице.

Средний многолетний коэффициент увлажнения ( $k$ ), среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ) и коэффициент вариации ( $C_v$ )

Пункт	Май			Июнь			Июль			Август		
	$k$	$\sigma$	$C_v$	$k$	$\sigma$	$C_v$	$k$	$\sigma$	$C_v$	$k$	$\sigma$	$C_v$
Белогорка	0,72	0,40	0,56	0,65	0,36	0,55	1,05	0,63	0,60	1,82	0,95	0,52
Великий Устюг	0,83	0,46	0,55	0,69	0,48	0,70	0,83	0,29	0,35	1,04	0,90	0,87
Ветлуга	0,81	0,56	0,69	0,73	0,51	0,70	1,20	0,92	0,77	0,90	0,77	0,86
Вологда	0,77	0,44	0,57	0,88	0,56	0,64	1,05	0,62	0,59	1,29	0,82	0,64
Вязьма	0,85	0,37	0,44	0,86	0,54	0,63	1,30	0,72	0,55	1,29	0,91	0,76
Елатьма	0,58	0,38	0,66	0,49	0,30	0,61	0,78	0,51	0,65	0,75	0,65	0,87
Иваново	0,76	0,40	0,53	0,77	0,61	0,79	1,30	0,92	0,71	1,15	0,80	0,70
Ижевск	0,46	0,36	0,78	0,57	0,43	0,75	0,75	0,40	0,53	0,81	0,52	0,64
Казань	0,43	0,40	0,93	0,57	0,43	0,75	0,58	0,40	0,69	0,80	0,50	0,63
Красный Холм	0,98	0,45	0,46	0,78	0,59	0,76	1,13	0,81	0,72	1,45	0,85	0,59
Киров	0,63	0,36	0,57	0,51	0,34	0,67	1,06	0,85	0,80	0,78	0,49	0,63
Кудымкар	0,72	0,41	0,57	0,53	0,29	0,55	0,88	0,51	0,58	0,97	0,84	0,87
Курмыш	0,54	0,34	0,63	0,62	0,51	0,82	0,71	0,56	0,79	0,75	0,45	0,60
Новгород	0,68	0,53	0,78	0,74	0,52	0,70	1,12	0,59	0,53	1,44	1,03	0,71
Нолинск	0,69	0,45	0,65	0,49	0,30	0,61	0,85	0,44	0,52	0,64	0,46	0,72
Пермь	0,72	0,50	0,69	0,63	0,42	0,67	0,84	0,46	0,55	0,98	0,68	0,69
Ржев	0,82	0,48	0,59	0,85	0,56	0,66	1,19	0,83	0,70	1,18	0,95	0,80
Рязань	0,65	0,37	0,57	0,61	0,41	0,67	0,64	0,40	0,63	0,85	0,63	0,74
Собакино	0,88	0,44	0,50	0,73	0,45	0,62	0,80	0,54	0,67	1,23	1,03	0,84
Старая Русса	0,61	0,33	0,54	0,77	0,40	0,52	1,16	0,69	0,51	1,27	0,83	0,65
Сыктывкар	0,72	0,36	0,50	0,54	0,30	0,56	0,75	0,37	0,49	0,98	0,50	0,51
Гихвин	0,71	0,47	0,66	0,66	0,41	0,62	1,13	0,64	0,57	1,63	1,29	0,79
Горжок	0,85	0,49	0,58	0,84	0,43	0,51	1,10	0,67	0,60	1,38	0,97	0,70
Городец	0,83	0,49	0,59	0,85	0,50	0,59	1,25	0,75	0,60	1,36	1,04	0,76
Чердынь	0,94	0,60	0,64	0,63	0,34	0,54	0,80	0,39	0,49	1,23	0,92	0,75
Яранск	0,62	0,45	0,73	0,67	0,38	0,57	0,97	0,58	0,60	0,86	0,54	0,63

Коэффициент увлажнения неодинаков как в различных районах, так и в течение вегетационного периода. В мае коэффициент увлажнения колеблется по территории в среднем от 0,60 до 0,90. Амплитуда колебаний составляет 0,55. Максимум наблюдается на станции Красный Холм и равен 0,98, а минимум в Казани — 0,43. Коэффициенты увлажнения менее 0,60 наблюдаются лишь в юго-восточной части территории. Следовательно, в мае, как показывает средний многолетний коэффициент увлажнения, рассматриваемая территория увлажнена недостаточно.

В июне изменчивость коэффициента увлажнения по территории еще меньше. Максимум отмечается на станции Вологда и составляет 0,88, а минимум — 0,49 на станциях Нолинск и Елатья. Таким образом, амплитуда колебаний коэффициента увлажнения по территории составляет 0,39. Следует отметить, что влагообеспеченность западных и северо-западных районов выше, чем восточных.

В июле значения коэффициента увлажнения существенно возрастают. На всей рассматриваемой территории преобладают коэффициенты увлажнения 0,80 — 1,30. Лишь на юго-востоке эти значения меньше 0,80. Наиболее влажными оказываются западные и центральные области. Здесь значения коэффициентов повсеместно более 1,00. Из сказанного следует, что в целом в июле влагообеспеченность сельскохозяйственных культур лучше, чем в первой половине вегетационного периода.

Самым влажным месяцем вегетационного периода является август. Абсолютный максимум коэффициента в это время составляет 1,82 (на станции Белогорка), а абсолютный минимум — 0,64 (на станции Нолинск). Таким образом, территориальные различия режима увлажнения в это время наибольшие, что определяет неодинаковые условия вегетации позднеспелых и озимых культур.

Характеристикой отклонения коэффициента увлажнения в отдельные годы от среднего многолетнего может служить среднее квадратическое отклонение ( $\sigma$ ) и коэффициент вариации ( $C_v$ ). Как видно из таблицы, наименьшие средние квадратические отклонения наблюдаются в мае и июне, по территории меняются мало и в среднем составляют 0,30—0,60.

В последующие месяцы среднее квадратическое отклонение возрастает: в июле преобладают по территории значения 0,60—0,90, в августе — 0,60 — 1,00.

Во все месяцы вегетационного периода наибольшие значения среднего квадратического отклонения соответствуют районам максимального увлажнения, т. е. с увеличением коэффициента увлажнения возрастает и среднее квадратическое отклонение.

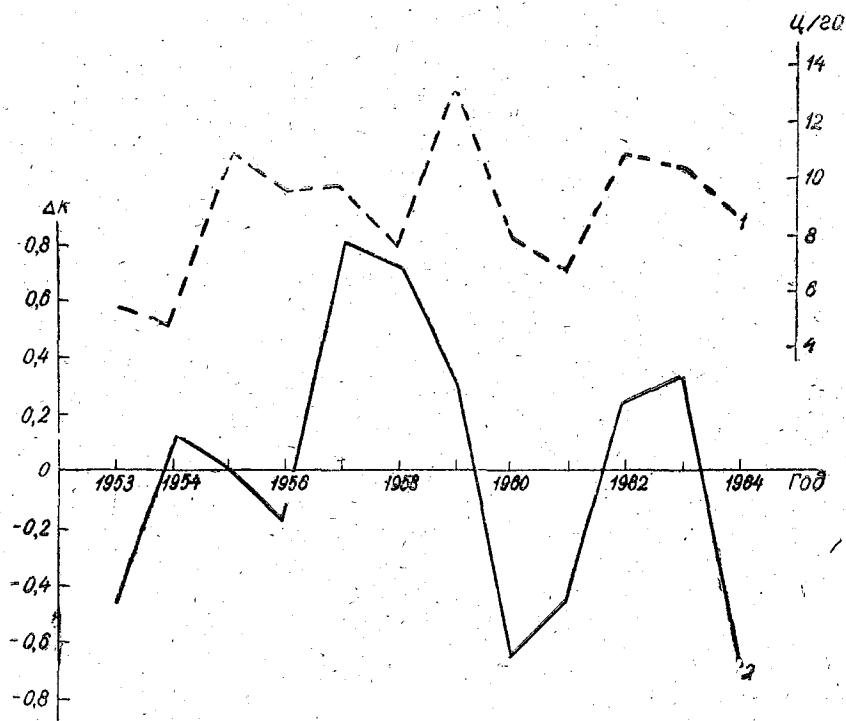
Относительная временная изменчивость коэффициента увлажнения, характеризующая коэффициентом вариации, на большей части рассматриваемой территории отличается значительной устойчивостью в течение вегетационного периода. В мае преобладают коэффициенты вариации от 0,50 до 0,70, в июне—августе — от

0,60 до 0,80. Однако амплитуды колебаний коэффициентов вариации и локализации изменчивости различны. В мае наибольшие значения наблюдаются в юго-восточных районах (0,93 на станции Казань), а к северо-западу коэффициент вариации уменьшается до 0,46 на станции Красный Холм. Следовательно, условия вегетации сельскохозяйственных культур в первой половине лета в юго-восточных районах в большей мере зависят от погодных условий.

В июне наибольшие значения коэффициента вариации наблюдаются также на юго-востоке и, кроме того, в центральных областях. По территории коэффициент вариации меняется от 0,51 (на станции Торжок) до 0,82 (на станции Курмыш).

В июле максимальные значения коэффициента вариации отмечаются в центральных районах (0,72—0,80), они уменьшаются наиболее заметно в северо-восточном и западном направлениях (0,35—0,60).

В августе максимум значений коэффициента вариации наблюдается в центральных западных (0,76—0,80) и центральных восточных областях (0,86—0,87).



Средняя областная урожайность яровой пшеницы и аномалии коэффициента увлажнения на станции Собакино Московской области:

1 — средняя областная урожайность; 2 — аномалии коэффициента увлажнения ( $\Delta\kappa$ )



Особенно большие положительные аномалии коэффициента увлажнения в течение всего вегетационного периода наблюдались в 1962 г. Избыток влаги неблагоприятно сказывается на условиях произрастания сельскохозяйственных культур и приводит к полеганию хлебов. Большие отрицательные аномалии отмечены в 1959, 1964, 1972 г., когда в этом районе создались резко засушливые условия. Из сказанного можно заключить, что характер увлажнения центральных районов нечерноземной зоны ЕТС неодинаков и испытывает значительные колебания как по территории, так и во времени. В результате в отдельные периоды могут создаваться условия как резко избыточного, так и резко недостаточного увлажнения.

Сопоставляя среднюю областную урожайность яровой пшеницы с аномалиями коэффициента увлажнения на станции Собакино Московской области в июне, наиболее показательном для влагообеспеченности в период вегетации, можно видеть, что существует тесная связь между ними (см. рисунок). Поэтому вопросы исследования увлажнения данной территории требуют более глубокого и всестороннего изучения и разработки способа его прогноза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Будыко М. И. Тепловой баланс земной поверхности. Л., Гидрометеиздат, 1956. 254 с.
2. Иванов Н. Н. Атмосферное увлажнение тропических и сопредельных стран земного шара. М.—Л., Изд. АН СССР, 1958 г. 311 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
<i>Н. Б. Барышников, Е. С. Субботина.</i> Изменение морфометрических характеристик русел по длине реки	3
<i>А. А. Левашов, С. В. Шмидт, О. М. Стрельченя, И. М. Ковригин.</i> Влияние вечной мерзлоты на русловые процессы и гидротехнические сооружения, расположенные в русле и на берегах рек	12
<i>Н. Б. Барышников, А. Б. Кареканов, Л. С. Курдубов.</i> Некоторые особенности расчетов максимального стока с малых водосборов и деформаций у сооружений	18
<i>Г. В. Иванов, Г. М. Федорова.</i> Построение планов течений для пойменных русел при взаимодействии руслового и пойменного потоков	30
<i>В. В. Коваленко, Н. Б. Барышников.</i> К вопросу экстраполяции кривой расходов при неустановившемся движении открытого потока	38
<i>Г. В. Иванов.</i> Экспериментальное изучение сопротивлений на вход в рукава при бифуркации русел	43
<i>А. Ф. Кудряшов.</i> О гидравлических сопротивлениях плоского стационарного потока в аллювиальном русле	50
<i>В. Г. Саликов.</i> Особенности гидравлики меандрирующих русел при выходе воды на пойму	58
<i>А. К. Хапаева.</i> Определение предельного бесплотинного водозабора	69
<i>С. Я. Павлов.</i> Моделирование руслового процесса в мелкозернистых песчаных грунтах	74
<i>А. С. Марченко.</i> К вопросу определения перепада уровней свободной поверхности при обтекании цилиндрических опор	82
<i>М. П. Заррин.</i> Определение размывающих скоростей различных почв степного Предкавказья	87
<i>Е. С. Субботина.</i> К вопросу о пропускной способности русел с поймами	95
<i>Г. Н. Угрюминов, Ю. А. Кузьмин, А. П. Морозов.</i> О точности измерения глубин и расчетов площадей водного сечения	101
<i>Л. М. Маргарян, А. Е. Восканян.</i> О русловых деформациях притоков озера Севан	104
<i>В. Д. Петрушенко.</i> Изменчивость увлажнения центральных областей нечерноземной зоны Европейской территории Союза в вегетационный период	108

Межвузовский сборник, 1977, вып. 63.

**Гидрология суши. Динамика потоков и русловые процессы.**

Редактор *З. Б. Ваксенбург.*

Корректоры: *И. М. Морозова, Л. В. Ломакина.*

---

М-12384      Сдано в набор 26/XI 1976 г.      Подписано к печати 15/VI 1977 г.  
Формат 60×90<sup>1/16</sup>      Тираж 500 экз.      Бумага тип. № 2  
Зак. 494      Уч.изд. л. 8      Темплан 1977 г., поз. 3309      Цена 1. 20 к.  
Издание ЛПИ им. М. И. Калинина. 195251, Ленинград, Политехническая, 29.

---

---

УДК 556.537

**Изменение морфометрических характеристик русел по длине реки.** Барышников Н. Б., Субботина Е. С. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 3—11

В статье рассматриваются закономерности распределения глубин, ширины и площадей живого сечения по длине реки.

Табл. 4. Ил. 2. Библ. 5.

---

УДК 556.535.6

**Влияние вечной мерзлоты на русловые процессы и гидротехнические сооружения, расположенные в русле и на берегах рек.** Левашов А. А., Шмидт С. В., Стрельчя О. М., Ковригин И. М. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 12—17.

В статье рассматриваются некоторые особенности русловых процессов в руслах рек, протекающих в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов.

Табл. 1. Ил. 1. Библ. 9.

---

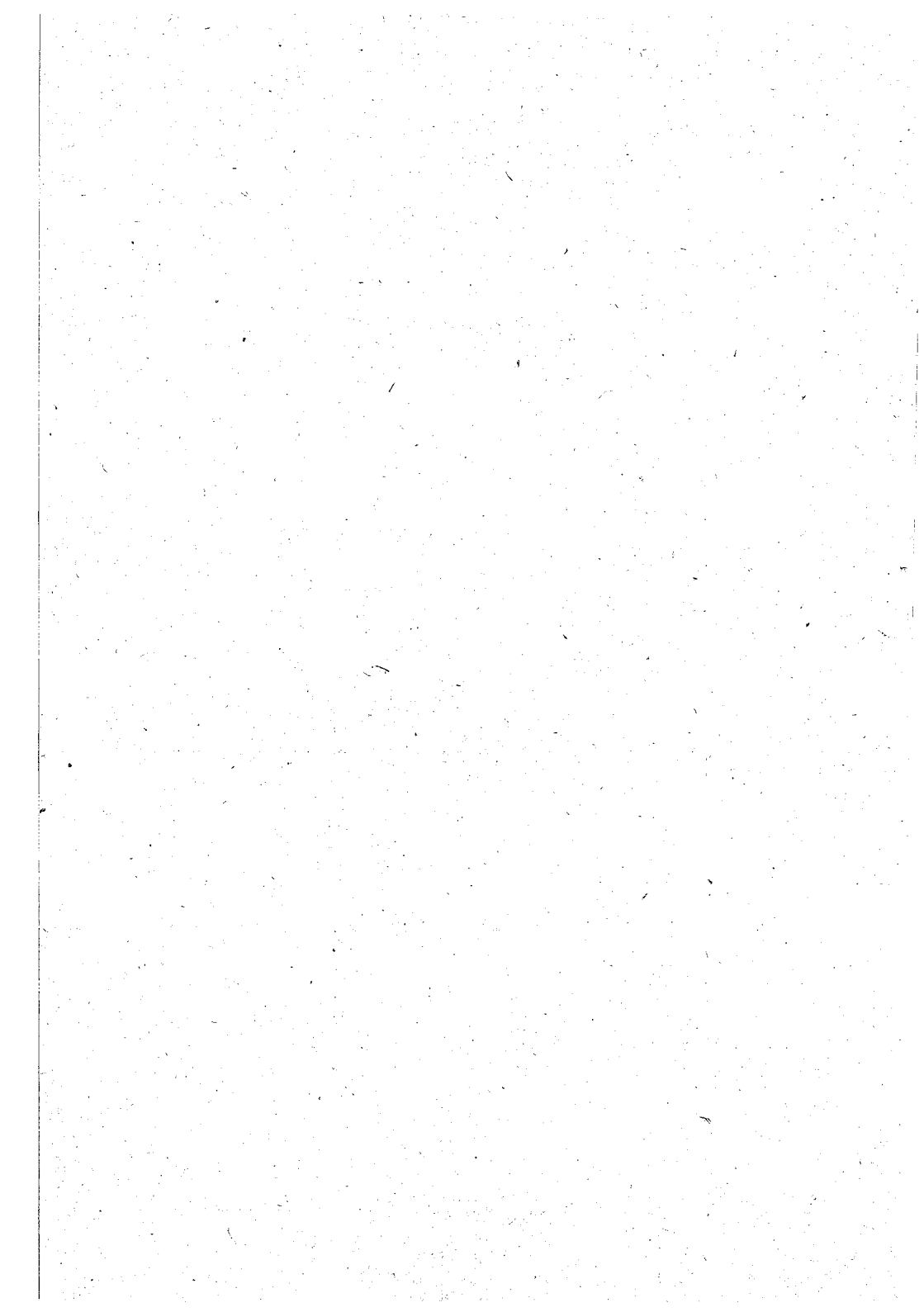
УДК 556.166+535.6

**Некоторые особенности расчетов максимального стока с малых водосборов и деформаций у сооружений.** Барышников Н. Б., Кареканов А. Б., Курдубов Л. С. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 18—29.

По данным наблюдений и расчетов на 100 малых водопропускных сооружениях Свердловской железной дороги уточняется методика расчета максимальных расходов воды 1%-ной и 0,33%-ной обеспеченности. Приведены натурные и расчетные данные по местному размыву ниже сооружений и отложению наносов в них. Даны рекомендации по упрощению формулы расчета глубины местного размыва, рекомендованной ведомственной инструкцией.

Табл. 6. Ил. 1. Библ. 4.

---



---

УДК 556.356

**Построение планов течений для пойменных русел при взаимодействии руслового и пойменного потоков.** Иванов Г. В., Федорова Г. М. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 30—37.

В статье изложен метод построения планов течений, разработанный Б. В. Проскуряковым, в применении к пойменным руслам. Модификация этого метода учитывает «кинематический эффект», возникающий при взаимодействии руслового и пойменного потоков. Метод опробован в экспериментальных и натуральных условиях (р. Луга, п. Толмачево).

Ил. 2. Библ. 10.

---

УДК 556.536

**К вопросу экстраполяции кривой расходов при неустановившемся движении открытого потока.** Коваленко В. В., Барышников Н. Б. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 38—42.

Рассмотрен один из возможных подходов к задаче об экстраполяции кривой расходов при неустановившемся движении воды в открытом потоке, основанный на использовании линеаризованных по расходу уравнений одномерной гидравлической идеализации, записанных для фиксированного гидроствора.

Библ. 8.

---

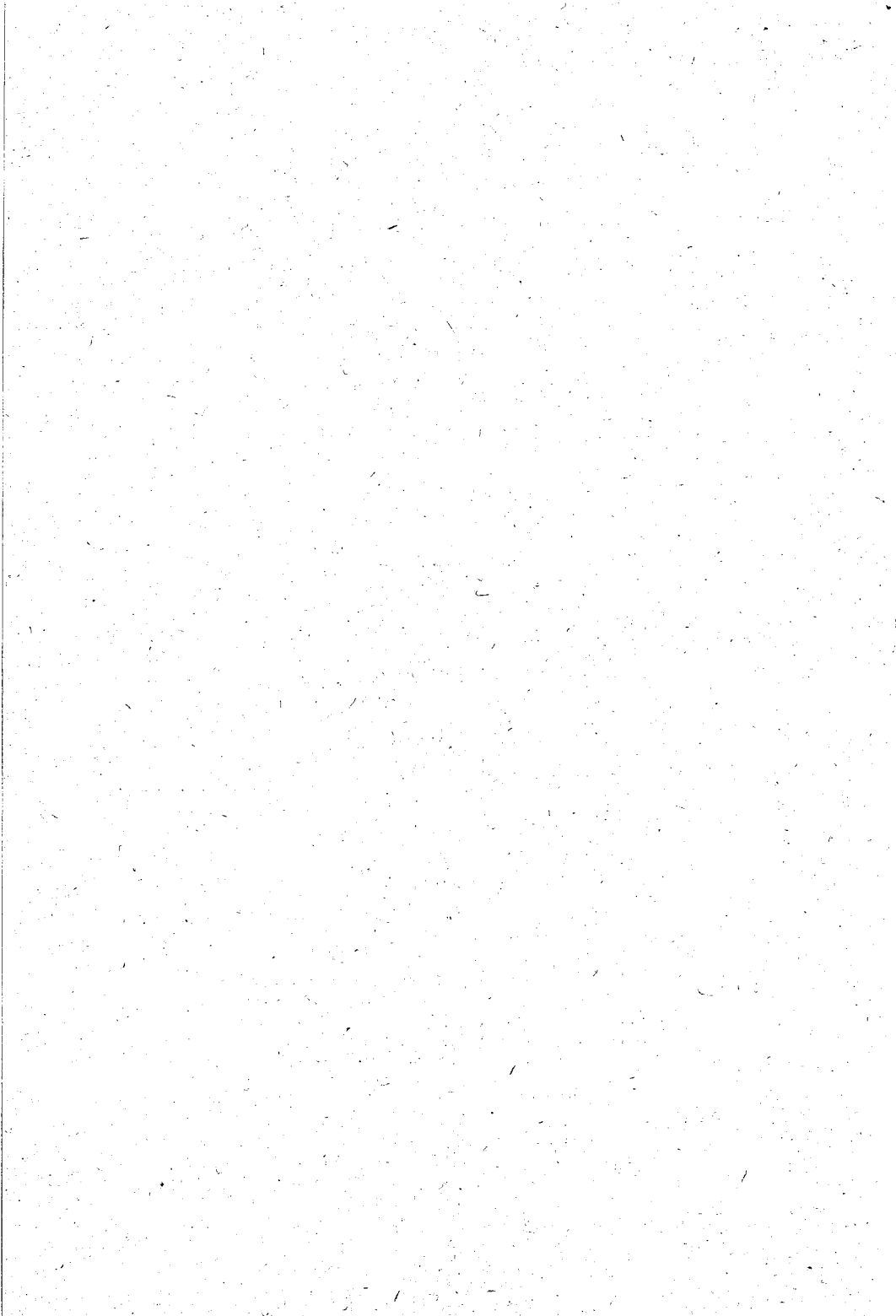
УДК 535.559

**Экспериментальное изучение сопротивлений на вход в рукава при бифуркации русел.** Иванов Г. В. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63. 43—49.

В статье излагаются результаты экспериментального изучения значений местного сопротивления на вход в рукава. Приводятся расчетные формулы, справедливые для условий опытов.

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 7.

---



---

УДК 532.517.4

**О гидравлических сопротивлениях плоского стационарного потока в аллювиальном русле.** Кудряшова А. Ф. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 50—57.

Приводятся результаты исследований гидравлических сопротивлений в аллювиальном русле, проведенных на основе теоретических и экспериментальных методов. Полученная зависимость может быть использована для оценки гидравлических сопротивлений в аллювиальных руслах при малой мутности потока.

Ил. 2. Библ. 14.

---

УДК 551.482.215

**Особенности гидравлики меандрирующих русел при выходе воды на пойму.** Саликов В. Г. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 58—68.

В статье приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований, проведенных на схематизированной модели меандрирующей реки. Показано, что с выходом воды на пойму, движение жидкости в пределах основного русла происходит с изменением расхода вдоль пути. В связи с этим выделяется четыре типа взаимодействия руслового и пойменного потоков. Для каждого типа взаимодействия приводится изменение основных гидравлических характеристик руслового потока по сравнению с гидравлическими характеристиками в условиях изоляции.

Ил. 3. Библ. 20.

---

УДК 627.84

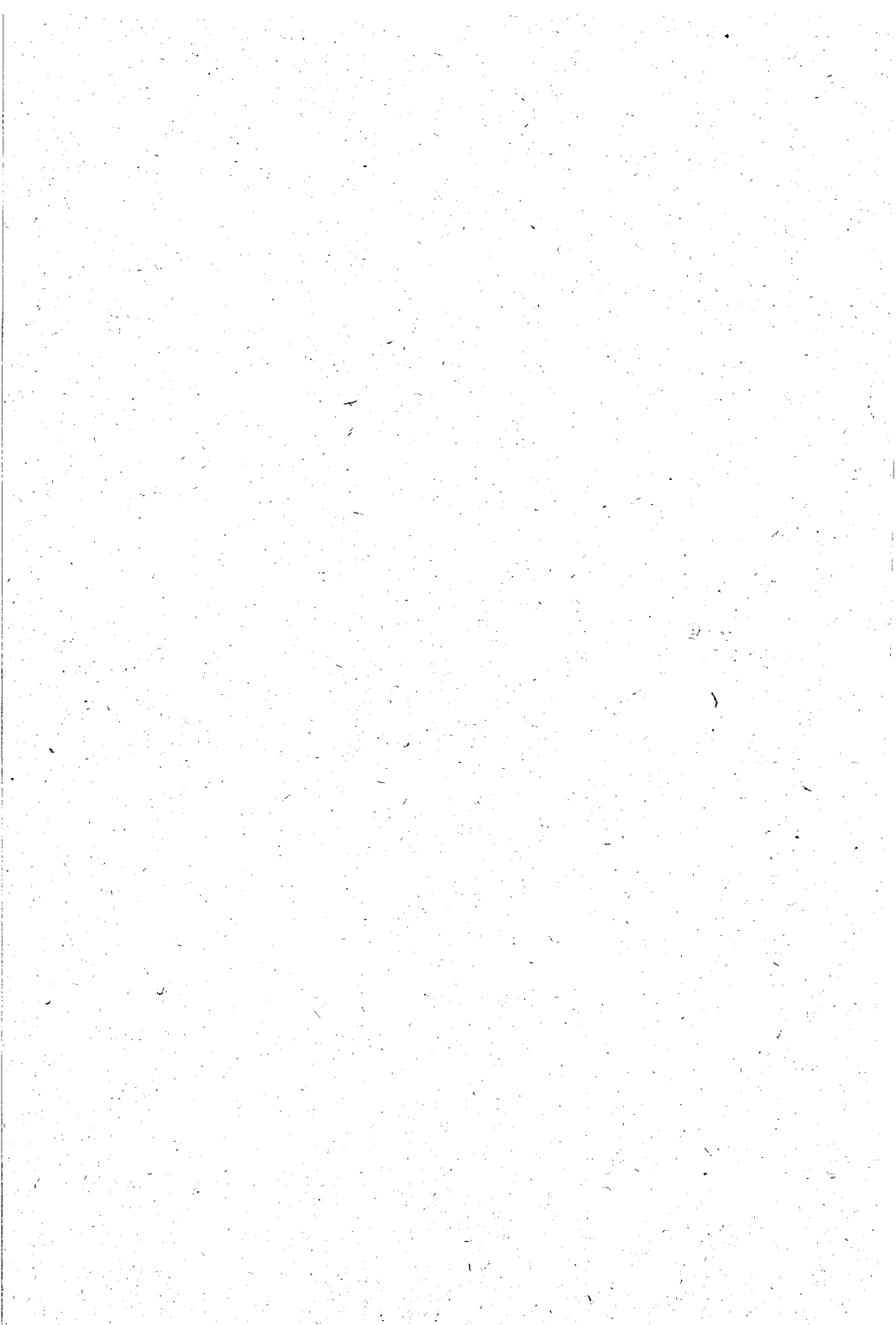
**Определение предельного бесплотинного водозабора.** Хапаева А. К. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 69—73.

В статье приводятся результаты исследований предельного бесплотинного водозабора, выполненных на гидравлической модели крупного масштаба. Разработана методика определения предельного водозабора при «форсировке» расходов с учетом обеспечения подобия водоворотных областей, определена автоматическая область по параметру  $k_1$  (коэффициент предельного водозабора). Определены коэффициенты предельного водозабора при расходах 95 и 97%-ной обеспеченности.

Табл. 2. Ил. 2. Библ. 7.

---





---

УДК 532.543.001

**Моделирование руслового процесса в мелкозернистых песчаных грунтах.** Павлов С. Я. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 74—81.

Рассматриваются требования, которым должны удовлетворять размываемые модели. Конкретно решается вопрос о моделях, на которых в качестве размываемого материала используется натуральный песок.

Оценивается возможность использования в качестве критерия подобия потоков в деформирующихся руслах отношения средней скорости к размывающей.

Даются зависимости для пересчета твердого расхода, мутности, времени деформации модельного руслового процесса на натурные условия.

Библ. 12.

---

---

УДК 532.543 : 624.094

**К вопросу определения перепада уровней свободной поверхности при обтекании цилиндрических опор.** Марченко А. С. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 82—86.

В работе приводятся результаты лабораторного исследования перепада уровней свободной поверхности непосредственно у обтекаемых жидкостью тел. Предложена эмпирическая формула, позволяющая определять величину перепада уровней в зависимости от параметра кинетичности и относительной глубины невозмущенного опорам потока.

Ил. 2. Библ. 7.

---

---

УДК 631.459

**Определение размывающих скоростей различных почв степного Предкавказья.** Зарин М. П. Межвузовский сборник, 1977, вып. 63, с. 87—94.

В статье приводится методика определения донных размывающих скоростей в гидроложке. Устанавливается связь между химическими свойствами различных почв степного Предкавказья и значениями  $v_{\Delta p}$ . Приведены расчетные значения  $v_{\Delta p}$ .

Табл. 1. Ил. 3. Библ. 9.

---

