

При искажении геометрического масштаба подбор материала модели может быть выполнен по-разному. Например, подбирают масштаб  $\lambda_L < \lambda_{L_{гр}}$ ; задаются значением  $\lambda_h = n\lambda_L$  (согласно [1; 2], принимают  $n = 2-6$ ); по формуле (18) определяют значение  $\lambda_{v01}$ , которое, согласно выражению (20), должно быть меньше  $\lambda'_{v01}$ . По  $\lambda_{v01}$  и натурным данным находят допускаемую скорость  $V_{01}$  и соответствующий ей вид (размер частиц) грунта. По второму варианту можно, задавшись значением  $d_m$ , определить  $\lambda_{v01}$ ,  $\lambda_L$ ,  $\lambda_h$  и т.д.

Полученные на модели данные пересчитывают для натуральных измерений с помощью масштабных коэффициентов (16) или (18).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по гидравлическим расчетам/Под ред. П.Г.Киселева. — М., 1975. — 313 с.
2. Гидротехнические сооружения/ Под. ред. Н.П.Розанова. — М., 1978. — 648 с.
3. М и р ц х у л а в а Ц.Е. Размыв русл и методика оценки их устойчивости. — М., 1970. — 179 с.
4. Г о н ч а р о в В.Н. Динамика русловых потоков. — Л., 1962. — 374 с.
5. Л е в и И.И. Моделирование гидравлических явлений. — М., 1967. — 235 с.
6. С т у д е н и ч н и к о в Б.И. Защита от размыва русл и нижних бьефов водосбросов: Рекомендации по проектированию. — М., 1974. — 45 с.
7. Р о с с и н с к и й К.И. Местный размыв речного дна в нижних бьефах крупных гидротехнических сооружений. — Тр. АН СССР, 1956. Сб. № 6. Проблемы регулирования речного стока. — 46—50 с.
8. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика. — М., 1983. — 544 с.
9. В а с и л ь ч е н к о Г.В., Л у к о ш к о Р.Ф. Исследование урванного режима половодий на физической модели участка р. Припяти при обваловании реки дамбами. — В кн.: Водное хозяйство и гидротехническое строительство. Минск, 1980, вып. 10, с. 103—109.
10. Л я х т е р В.М., П р у д о в с к и й А. Гидравлическое моделирование. — М., 1984. — 392 с.

УДК 532.517.4:51

Ю.М.КОРЧОХА, канд. техн. наук,  
В.П.ШЕЙНОВ, канд. физ.-мат. наук  
(БелНИИМВХ)

### ТУРБУЛЕНТНОСТЬ РЕЧНОГО ПОТОКА ПРИ ГРЯДОВОМ РЕЛЬЕФЕ ДНА

Кинематическая структура естественного руслового потока при наличии на дне его песчаных гряд представляет наименее изученный и вместе с тем наиболее сложный случай скоростного поля потока.

Имеющиеся сведения о кинематической структуре естественного потока с грядовым дном либо ограничены данными об осредненных скоростях, либо, если это даже турбулентные характеристики, не увязаны с конкретными русловыми формами.

В предлагаемой работе предпринята попытка представить скоростное поле потока, обтекающего вполне конкретные русловые формы (песчаные гряды). Поток характеризуется числом  $Re = 7 \cdot 10^5 - 9,4 \cdot 10^5$ , а его дно — относительной зернистой шероховатостью  $d_{50}/H = 7,27 \cdot 10^{-5}$ . Ширина потока 30 м. Характер наносов, слагающих песчаные гряды, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Механический состав наносов, слагающих гряды на реке Полометь

Дата отбора пробы	Место отбора	Содержание частиц (в % по весу) при диаметре (в мм)							
		10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,2	0,2–0,1	0,1–0,05
16/IV	Гребень	4,8	4,5	10,7	31,9	43,7	3,8	0,4	0,2
	Подвалье	25,6	18,1	25,6	16,9	12,0	1,8	–	–

Скорость течения измерялась одновременно в десяти точках по глубине специальными вертушками, оборудованными контактами, обеспечивающими сигнал через 5 оборотов. При шаге винта 0,220–0,250 возникала возможность надежно регистрировать пульсационные скорости, вызванные прохождением вихрей, линейный масштаб которых превышает 1,0 м [1].

Задача математической обработки сводилась к выявлению скрытых периодичностей в пульсации скоростей. Для этих целей были использованы средства корреляционного и спектрального анализов.

Корреляционная функция любого периодического процесса является периодической функцией с тем же периодом. Это положение было принято в рассматриваемом случае.

В речном потоке, по дну которого активно перемещаются песчаные гряды, функция  $v'(\tau)$  представляет собой случайный процесс, порождаемый пуассоновской выборкой. В таком потоке, исходя из формы корреляционной функции, можно выделить две зоны: основное течение и придонную область в подвалье гряды, равную ей по высоте.

В основном потоке корреляционная функция представляет собой автокорреляцию узкополостного случайного шума, которая аппроксимируется уравнением

$$R_{v'}(\tau) = ab \left( \frac{\sin \pi B\tau}{\pi B\tau} \right) \cos 2\pi f_0 \tau. \quad (1)$$

Здесь  $B$  – ширина спектра по линии, где верхняя доверительная граница его пересекается со спектральной функцией;  $f_0$  – граничная частота (частота, для которой определена ширина спектра);  $\tau$  – время;  $a$  – постоянная, определяемая соотношением  $r(\tau_2)/B$ .

В подвалье корреляционная функция описывается уравнением (2) (обозначения те же, что и для формулы (1)):

$$R_{v'}(\tau) = e^{-f_0 \tau} \cos 2\pi f_0 \tau. \quad (2)$$

В отдельных случаях в области потока, расположенной вблизи свободной поверхности (на глубине 0,15–0,40 м) на фоне колебаний случайного шума можно проследить более замедленные изменения функции  $R_{v',\tau}$  (см. рис. 1).

Общим почти для всех 185 автокорреляционных функций является то, что они имеют вид гармонических колебаний. Это в свою очередь указывает на наличие цикличности в процессах, протекающих в русловом потоке (см. рис. 1, а, б).

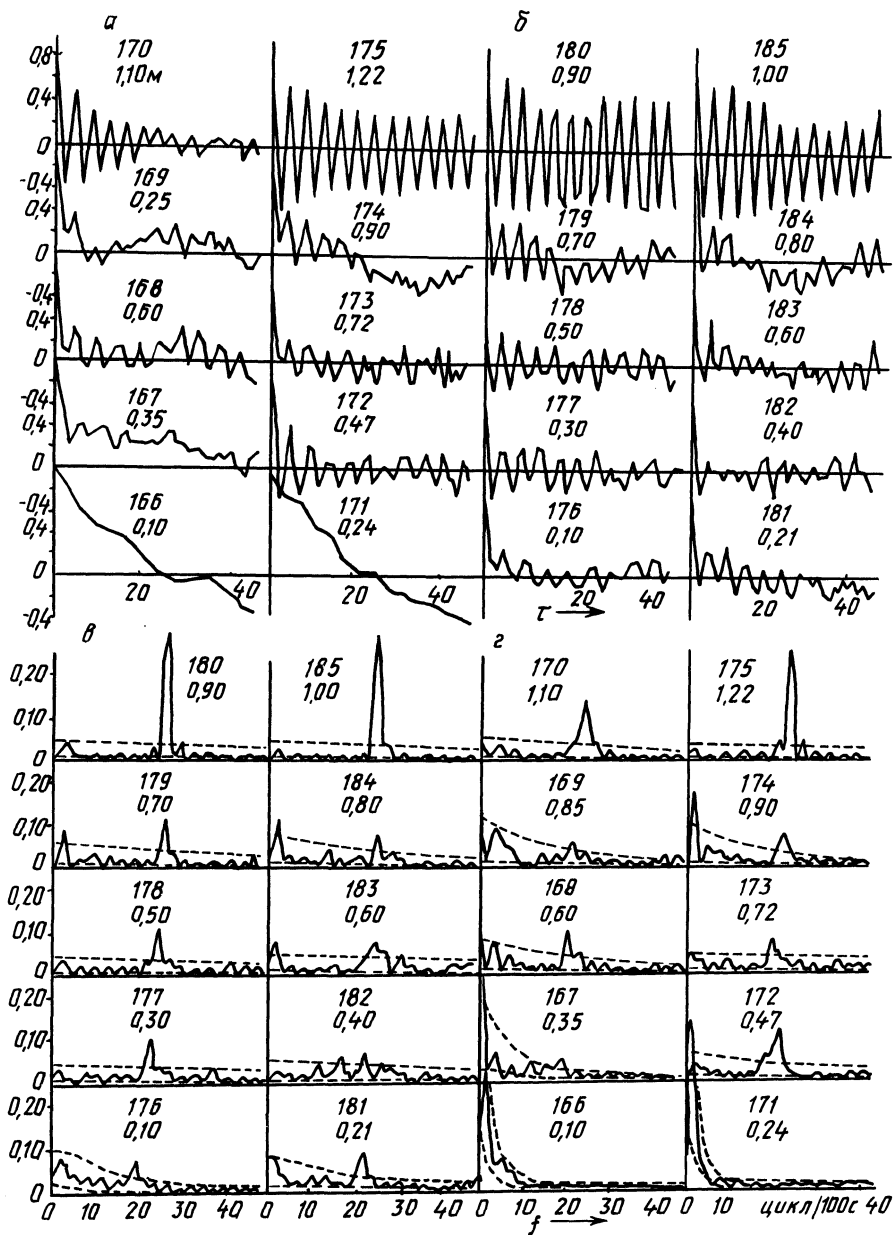


Рис. 1. Корреляционные (а и б) и спектральные (в и г) функции пульсационных скоростей в речном потоке.

Более эффективным методом для обнаружения периодичностей является спектральный анализ. Спектры пульсационных скоростей также подтвердили, что для рассматриваемого процесса характерны гармонические колебания. В преобладающем количестве случаев частота этих колебаний составляет 18–30 циклов за 100 с (см. рис. 1, в, г). Можно проследить четкую зависимость между продолжительностью цикла и скоростью течений: чем больше скорость потока в точке, тем выше частота периодов. Есть основание считать, что выявленные гармоники обусловлены прохождением в потоке вихревых образований, а частоты характеризуют определенные размеры конкретных вихревых возмущений.

Приняв, что пик в спектре дисперсий отражает характерный временной масштаб ( $M_T$ ) вихревого возмущения, по зависимости (3)

$$L = \bar{v}M_T, \quad (3)$$

определяем линейный масштаб вихрей. Характерные размеры были нанесены на специальную диаграмму, которая представляет продольное сечение потока. Соединив затем точки с одинаковыми значениями линейного масштаба, получим изолинии, отображающие положение вихря в толще потока (рис. 2).

В потоке можно проследить две вихревые зоны. Одна расположена в его ядре (вихри размещаются между гребнями двух смежных гряд и имеют продольный размер, соизмеримый с длиной гряд). В среднем длина вихря в ядре потока составляет 3–4 глубины, отношение горизонтального размера к вертикальному 5,5–6,5. Другая зона охватывает подвалье гряды. Поперечные размеры вихря здесь лимитируются высотой гряды. В данном случае размер

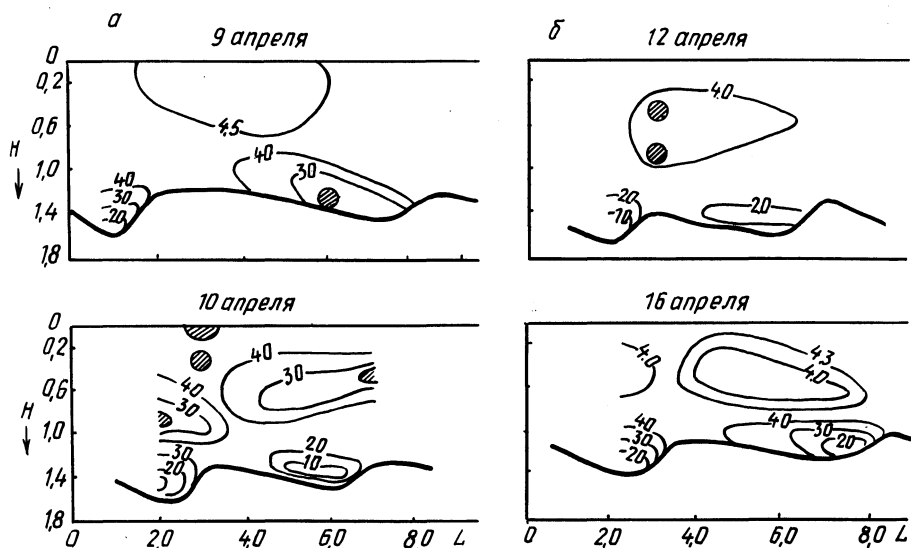


Рис. 2. Структура турбулентного руслового потока на пике (а) и спаде (б) половодья.

вихря по вертикали не превышает высоты гряды более чем на 10 см. Соотношения горизонтального и вертикального размеров примерно те же, что и у основного вихря.

Анализ спектров показывает, что, кроме гармоник с частотой 18–30 циклов за 100 с, в отдельных случаях можно проследить и колебания пульсаций, период которых достигает 50 с. По-видимому, в данном случае мы имеем дело с вихревыми образованиями размером в несколько десятков метров. Об этом же говорит и наличие значимых линейных трендов, выявленных в некоторых реализациях. Кроме автокорреляционных функций, нами был применен метод взаимного корреляционного анализа, с помощью которого изучались линейные статистические связи между пульсациями скоростей в соседних по вертикали точках.

Анализ материалов показал, что большинство смежных точек по вертикали имеют статистически значимые корреляционные связи. Исключение составляют точки, относящиеся к различным структурным образованиям в толще потока. Например, не коррелируют две соседние точки, если одна расположена в зоне вихря, а другая — в межвихревой зоне. Внутри вихря смежные точки имеют статистически значимые коэффициенты корреляции (0,25–0,35 при верхней доверительной границе 0,17–0,18).

Итак, практически во всех реализациях удалось выявить гармонические колебания, которые, как мы считаем, вызваны наличием в потоке вихревых образований. Однако есть ряд точек, где значимых циклов установить не удалось. Пять таких точек находятся внутри вихрей, одна расположена вблизи поверхности и две — в толще потока в межвихревом пространстве. Этот факт вовсе не означает, что в данных точках отсутствуют циклические изменения пульсаций скорости потока. По-видимому, приборы оказались не в состоянии их зафиксировать. В некоторых точках, где не было установлено значимых циклов, отсутствовала и стационарность ряда.

Далее, нельзя вести речь о турбулентном потоке, не рассматривая такую характеристику, как интенсивность турбулентности. В нашем случае она выражается уравнением (4) :

$$I = \sqrt{(\overline{v'_i})^2 / \overline{v}} = \overline{\sigma v'} / \overline{v}. \quad (4)$$

Анализ экспериментальных данных (табл. 2) показывает, что наибольшая интенсивность турбулентности наблюдается в точках потока, расположенных в пространстве, разделяющем две вихревые зоны. Из литературных источников (И.К.Никитин, 1963) известно, что максимальная интенсивность турбулентности имеет место на границе пограничного слоя. По аналогии с этим положением в турбулентном речном потоке в русле с грядовым дном также можно выделить слой, где скорости течения резко возрастают от нуля на стенке до значений, характерных для основной толщи потока. В рассматриваемых исследованиях наибольшие значения  $I$  имели место на границе этого слоя с внешним потоком. Если допустить, что толщина пограничного слоя при турбулентном режиме течения  $\delta \sim l \text{Re}^{-0,2}$  ( $l$  — характерный размер потока), то станет ясно, что в русловом потоке, где проводились опыты, она составляет около 10 см. Примерно на этой же отметке от дна находятся наибольшие значения интенсивности турбулентности.

Таблица 2. Распределение осредненных скоростей и интенсивности турбулентности на глубине потока при спаде половодья

Глубина точки от поверхности потока, м	Осредненная скорость в точке измерения, м/с	Интенсивность турбулентности, м/с	Глубина точки от поверхности потока, м	Осредненная скорость в точке измерения, м/с	Интенсивность турбулентности, м/с
1	2	3	4	5	6
Подвалье					
H = 1,3			0,60	0,92	0,14
0,06	1,02	0,13	0,71	0,79	0,20
0,19	1,02	0,12	0,82	0,81	0,18
0,33	1,00	0,098	0,93	0,71	0,19
0,46	1,01	0,097	1,04	0,71	0,15
				Подвалье	
0,60	0,87	0,14	H = 1,28		
0,73	0,92	0,13	0,06	1,01	0,14
0,87	0,78	0,18	0,18	1,02	0,14
1,00	0,81	0,15	0,30	1,02	0,088
1,15	0,58	0,19	0,43	0,99	0,12
1,27	0,34	0,29	0,56	0,95	0,13
Гребень					
H = 1,12			0,68	0,92	0,15
0,05	1,01	0,14	0,81	0,86	0,16
0,16	1,02	0,13	0,93	0,78	0,20
0,26	1,02	0,10	1,04	0,32	0,55
0,37	1,00	0,11	1,18	0,10	0,45
				Гребень	
0,48	0,96	0,12	H = 1,05		
0,59	0,92	0,13	0,05	1,05	0,13
0,70	0,79	0,18	0,15	1,05	0,13
0,80	0,81	0,16	0,25	1,06	0,081
0,91	0,71	0,13	0,35	1,04	0,084
1,02	0,71	0,16	0,45	1,04	0,11
Напорный склон					
H = 1,14			0,55	1,01	0,11
0,05	1,01	0,14	0,65	0,96	0,15
0,16	1,02	0,14	0,75	0,92	0,15
0,27	1,02	0,10	0,84	0,94	0,12
0,38	1,00	0,10	0,95	0,82	0,14
0,49	0,96	0,12			

Данные натурных исследований позволили получить уравнение (5):

$$M = 5,61I^{-0,28} - 5,50, \quad (5)$$

которое отражает зависимость масштаба турбулентности от ее интенсивности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С ни щ ен ко Б.Ф., К л ав ен А.Б., К ор ч о х а Ю.М. Пространственный характер движения песчаных гряд и кинематика потока над ними. — Тр. ГГИ, 1972, вып. 190, с. 151–164.