

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 3 — 1973

УДК 532.517.4.627.157

К. М. АРБУЛИЕВА, С. К. ОЛЕВИНСКАЯ, А. А. ПИВОВАРОВ

НЕКОТОРЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАЧКООБРАЗНОГО ДВИЖЕНИЯ ГРАВИЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Дается краткое описание экспериментов и их статистическая обработка для выявления параметров распределения скачкообразного движения гравия по закрепленному шероховатому дну в турбулентном потоке. Показано, что распределение горизонтальных и вертикальных скоростей воды и частиц гравия в придонной области близко к нормальному.

Изучение статистических характеристик сальтирующего или скачкообразного движения наносов имеет существенное значение как для разработки теории и методов расчета твердого расхода, переносимого турбулентными потоками, так и для выявления их влияния на кинематическую структуру самих потоков. Однако работы, посвященные этим вопросам, очень малочисленны. Обобщение их применительно к песчаным наносам дается в [1]. Движение одиночных частиц рассматривается также в [2]. Результаты этих исследований не могут быть прямо использованы при изучении движения частиц большой гидравлической крупности при значительной концентрации их в потоке.

В связи с этим на кафедре физики моря и вод суши совместно с Институтом водных проблем АН СССР проводились исследования скачкообразного движения гравия по закрепленному шероховатому дну при различной концентрации твердых частиц в потоке. В настоящей работе даются результаты статистической обработки проведенных экспериментов и количественные характеристики параметров распределения горизонтальных и вертикальных составляющих скорости течения и движения твердых частиц.

Эксперименты проводились в гидродинамическом лотке со стеклянными стенками длиной 25,5 м, шириной 0,6 м и высотой 0,5 м. Гранулометрический состав использованного гравия приведен в табл. 1. Гидравлическая крупность гравия составляла 26—30 см/сек.

Исследования проводились на модели с закрепленным дном с шероховатостью, образованной гравием того же гранулометрического состава. Гравий выкладывался на участке лотка длиной 11,5 м с уклоном поверхности $i=0,026$ и на участке от 11,5 до 13 м — без уклона. Поверхность гравия цементировалась без нарушения естественной шероховатости. Для исследования движения частиц гравия и скоростей потока с наносами использовался метод киносъемки.

Измерения скоростей течения в потоке без наносов с помощью трубки Пито показали, что начиная с 4 м скоростной режим потока вдоль модели можно считать равномерным, а влияние боковых стенок исчезает на расстоянии 15 см от борта лотка. В связи с этим рабочий участок для киносъемки был выбран на расстоянии 9 м от начала модели. Щель для освещения располагалась на расстоянии 19—20 см от передней стенки лотка, ширина освещенной полосы на дне потока составляла около 10 см. Скорость съемки 40—45 кадров в секунду, длительность—15—20 сек.

Таблица 1

Диаметр частиц, мм	Процентное содержание (по весу)
2—3	0,2
3—5	43,1
5—7	51,1
>7	5,7

Для подачи твердого расхода была установлена металлическая платформа с выдвигающимся дном, не нарушавшая плавного входа воды на модель. Количество гравия, поступающего в поток, определялось скоростью поднятия подвижного дна платформы.

С уклоном $i=0,026$ и глубиной $H=7$ см была проведена серия опытов, различающихся концентрацией сальтирующих частиц в потоке. Средняя для всей толщи потока объемная концентрация наносов, полученная путем приближенных оценок по кадрам киносъемки, составляла в опытах с малым твердым расходом 0,001, а в опытах с массовым твердым расходом — 0,01.

Во время эксперимента контролировался расход воды и проводились измерения глубины водного потока и уклона водной поверхности мерной иглой. Поле скоростей жидкости определялось с помощью индикаторов — частиц нейтральной плавучести из пенополистирола диаметром 2—2,5 мм.

Полученные кинофильмы были подвергнуты статистической обработке. Выбор кадров для обработки проводился из условия возможности прослеживания смещения частиц на двух смежных кадрах, обеспечения необходимой статистики и статистической независимости измеряемых величин. Исходя из этого, с каждого кинофильма печаталось по два последовательных кадра через равный интервал в 28 кадров. На каждой паре последовательных кадров отмечались наиболее достоверно опознаваемые частицы (наносов и индикаторов) и путем наложения координатной сетки на фотографии измерялись координаты отмеченных частиц. По величине смещения частиц и временному интервалу между соседними кадрами определялись горизонтальные и вертикальные составляющие скорости движения частиц.

По результатам статистической обработки получены гистограммы распределения горизонтальных скоростей жидкости для двух различных уровней над дном потока. Для их построения выбирались все индикаторные частицы, обнаруженные на фотографиях в интервалах высот 8—12 мм и 12—16 мм, что в натуре соответствует слоям 25,6—38,4 мм и 38,4—51,2 мм. Интервал скоростей для построения гистограмм был принят равным 0,15 см/сек. Для каждого слоя в отдельности подсчитывалось общее число частиц N и число частиц n , скорость которых попала в тот или иной интервал. По гистограммам каждого из слоев были рассчитаны средневзвешенная скорость \bar{V}_x и дисперсия σ . С этими параметрами, полученными из экспериментальных данных, вычислены кривые нормального распределения. Эмпирические гистограммы и соответствующие им теоретические кривые нормального распределения представлены на рис. 1. Аналогичным образом были рассчитаны гистограм-

мы и кривые нормального распределения горизонтальных скоростей частиц гравия, представленные на рис. 2.

Оценка нормальности распределения проводилась по коэффициентам асимметрии A и эксцесса E , вычисленным по экспериментальным данным. В качестве критериев согласия экспериментального распределения с нормальным законом приняты следующие условия [3]:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)}, \quad |E| \leq 5\sqrt{D(E)}, \quad (1)$$

где $D(A)$ и $D(E)$ — дисперсии коэффициентов A и E , равные

$$D(A) = \frac{6(N-1)}{(N+1)(N+3)},$$

$$D(E) = \frac{24N(N-2)(N-3)}{(N+1)^2(N+3)(N+5)}.$$

В табл. 2 приводятся параметры распределения, коэффициенты A и E и величины $D(A)$ и $D(E)$ для кривых рис. 1 и 2.

Из рисунков 1 и 2 и табл. 2 видно, что распределение горизонтальных окрестностей потока и твердых частиц по принятым оценкам удовлетворяет нормальному закону. При этом величина дисперсии как для потока, так и для частиц гравия возрастает с приближением ко дну, что может быть связано с увеличением интенсивности турбулентности в придонной области. При увеличении концентрации твердых частиц в потоке дисперсия их горизонтальных скоростей также возрастает.

Коэффициент асимметрии A положителен в слое 6,4—12,8 мм и отрицателен в более высоком слое для обоих видов твердого расхода. Положительное значение A соответствует увеличению числа частиц с малыми скоростями, а отрицательное — увеличению числа частиц со скоростями, большими средней, чем в случае идеального нормального распределения. По-видимому, в нижнем слое оказывается тормозящее влияние дна и взаимодействие частиц при их кол-

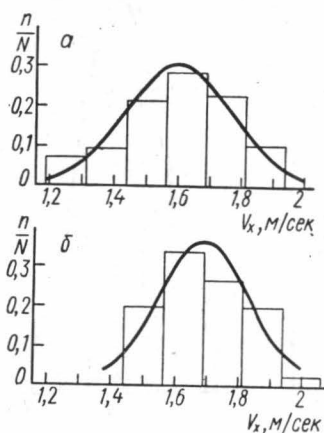


Рис. 1. Распределение горизонтальных составляющих скоростей потока: a — слой 25,6—38,4 мм и b — слой 38,4—51,2 мм

Таблица 2

		N	V_x	σ	A	E	$D(A)$	$D(E)$	
Водный поток	25,6—38,4 мм	95	1,6	0,17	-0,35	-0,60	0,06	0,22	
	38,4—51,2 мм	113	1,7	0,14	0,26	-0,82	0,05	0,19	
Гравий	6,4—12,8, мм	малый расход	285	0,93	0,234	0,18	0,80	0,02	0,082
		массовый расход	231	0,80	0,250	0,115	0,41	0,02	0,097
	12,8—19,2, мм	малый расход	190	1,09	0,218	-0,29	0,52	0,03	0,12
		массовый расход	366	0,93	0,234	-0,06	0,89	0,02	0,06

лективном движении, а в более высоком слое — ускоряющее влияние потока.

Из таблицы 2 видно также, что средняя горизонтальная скорость твердых частиц возрастает с удалением от дна и уменьшается с увеличением их содержания в потоке.

По результатам статистической обработки для вертикальных составляющих скоростей частиц гравия построены полигоны. Точки, рассчитанные по экспериментальным данным, и соответствующие нормальные кривые нанесены на рис. 3 для двух уровней и двух видов твердого расхода. Эмпирические параметры распределения \bar{V}_y и σ , коэффициенты A и E и величины $D(A)$ и $D(E)$ для вертикальных скоростей приведены в табл. 3.

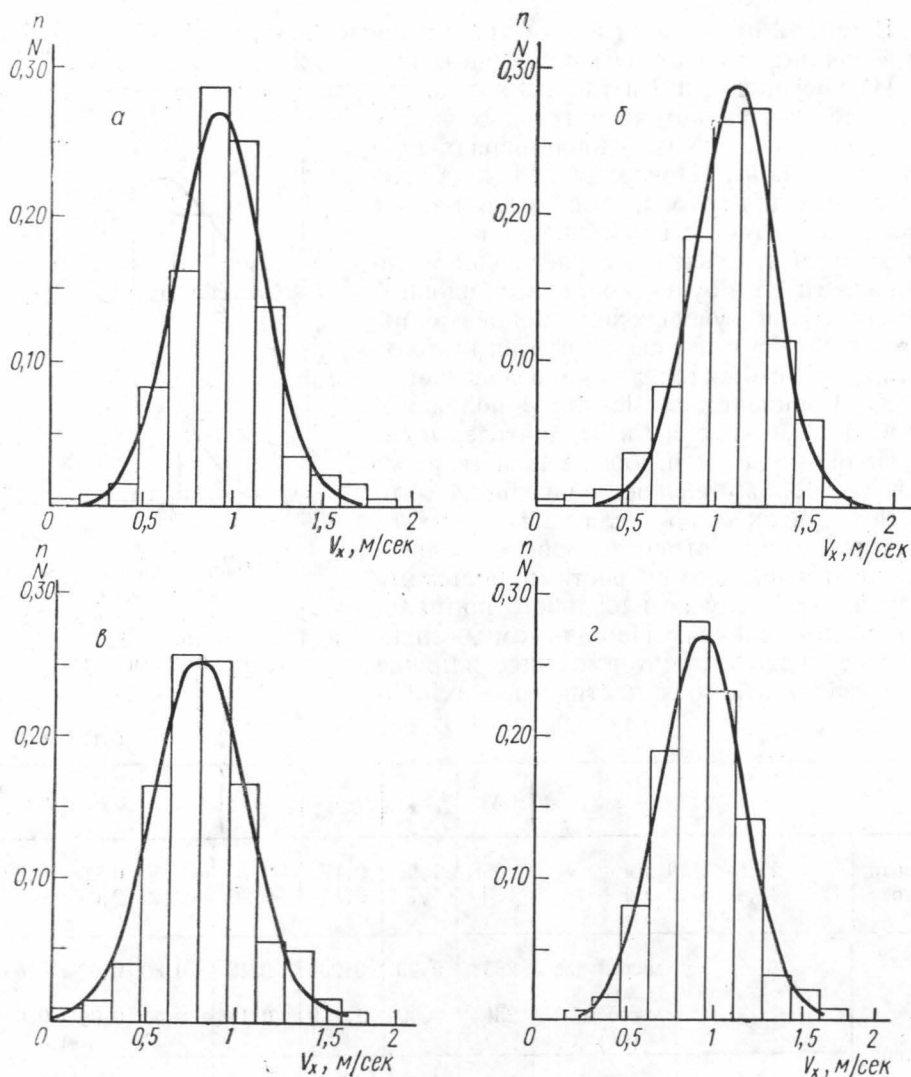


Рис. 2. Распределение горизонтальных скоростей частиц гравия при малом (а, б) и массовом (в, г) твердом расходе: а и в — слой 6,4—12,8 мм; б и г — слой 12,8—19,2 мм

Оценки по формулам (1) показали, что распределение вертикальных скоростей твердых частиц удовлетворяет нормальному закону. Изменение дисперсии σ в распределении вертикальных скоростей иное: σ практически не зависит от высоты частиц над дном потока, а с увеличением концентрации величина дисперсии для вертикальных скоростей

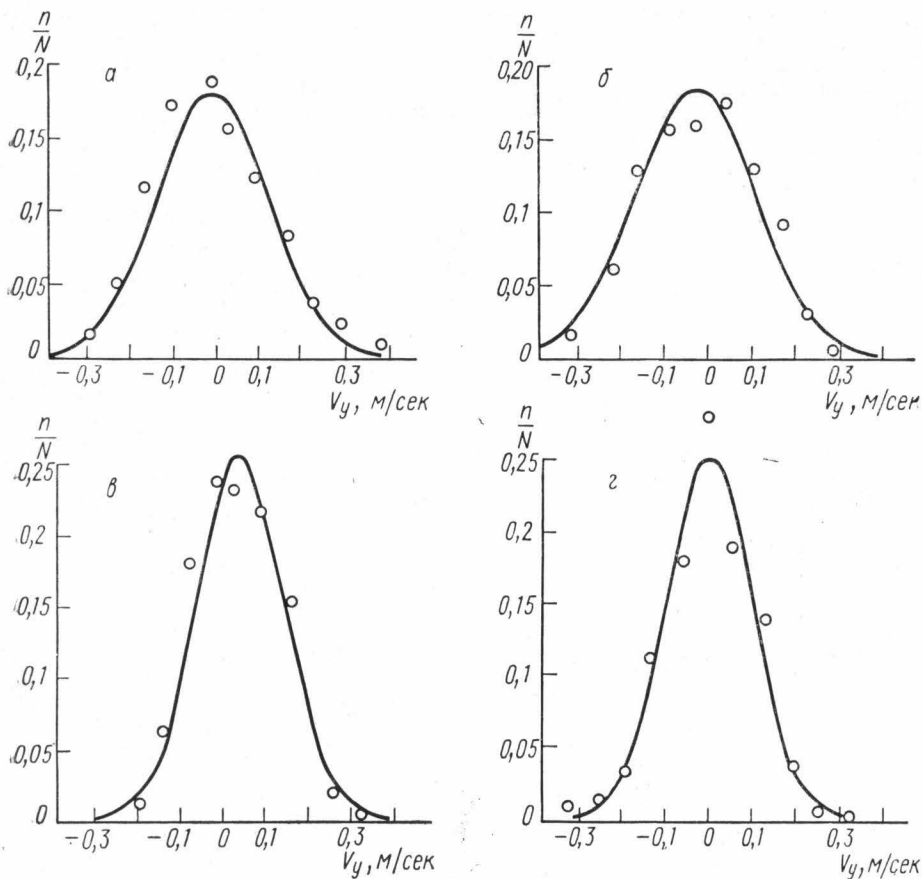


Рис. 3. Распределение вертикальных скоростей частиц гравия. Обозначения те же, что на рис. 2

Таблица 3

		N	\bar{V}_y	σ	A	E	$D(A)$	$D(E)$
6,4—12,8 мм	малый расход	301	-0,006	0,14	0,35	-0,38	0,02	0,05
	массовый расход	209	0,045	0,10	0,14	0,06	0,03	0,11
12,8—19,2 мм	малый расход	191	-0,029	0,14	0,21	-0,40	0,03	0,11
	массовый расход	327	0,003	0,10	0,29	0,04	0,02	0,07

уменьшается. Средняя вертикальная скорость частиц гравия на обоих уровнях и для обоих видов твердого расхода близка к нулю.

Статистическая обработка движения частиц гравия в среднем для всей придонной области показала, что распределение горизонтальных и вертикальных скоростей частиц удовлетворяет нормальному закону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л., 1966.
2. Россинский К. И., Любомирова К. С. Скачкообразное движение твердой частицы по льду турбулентного потока. «Труды ГГИ», вып. 162, 1969.
3. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968.

Поступила в редакцию
1.6 1971 г.

Кафедра
физики моря и вод суши