

1958. — 396 с. 4. Караушев А.В. Речная гидравлика. — Л., 1969. — 416 с. 5. Швецов М.С. Петрография осадочных пород. — М.—Л., 1948. 6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов. — М., 1969. — 115 с. 7. Смирнов В.Н. Курс высшей математики. — М.—Л., 1951, т. 3. — 811 с. 8. Шнеерсон М.С., Кудряшова Н.Ф. Об одной задаче наклонной производной для гармонической функции трех независимых переменных. — В кн.: Дифференциальные уравнения. Минск, 1972, т.10, с.1906—1908. 9. Фадеев П.Н. Пески СССР. — М., 1951. — 290 с. 10. Кудряшов А.Ф. Результаты некоторых опытов по изучению русловых потоков на размываемых моделях. — Труды III. Всесоюзн. гидрол. съезда, 1960, т. 5, с. 229—236. 11. Коротков В.Е. К выводу обобщенной формулы неразрывающейся скорости для несвязных грунтов. — Гидротехническое строительство. М., 1976, № 10, с. 27—28.

УДК 532.5

А.С.КАЛИНОВИЧ, канд. техн. наук (ЦНИИКИВР)

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ПОДСТИЛАЮЩЕМ ПОТОК НЕСВЯЗНОМ ГРУНТЕ

Исследованиями последних лет установлено, что скорость и ее пульсации на водонепроницаемой границе не равны нулю и распространяются на некоторую глубину подстилающего поток несвязного грунта [1, 2]. Пульсации скорости в грунте не совпадают по фазе и амплитуде с пульсациями в придонной области [3]. Это несовпадение приводит к периодическому возникновению на верхней грани частиц пониженного давления, а на нижней — повышенного. С целью изучения этого явления и установления роли взвешивающего усилия, возникающего вследствие рассогласования давления, в нарушении устойчивости частиц и были осуществлены специальные эксперименты.

Опыты проводились на гидравлической установке с замкнутым оборотом рабочей жидкости. Использовался лоток сечением 0,145 x 0,145 м, длиной 8,0 м, имеющий на расстоянии 3,5 м от выхода прямок, в который загружается исследуемый грунт.

Исследование осуществлялось с помощью электрохимического способа измерения скоростей [4], сущность которого заключается в придании исследуемому потоку свойств электропроводности и в измерении скоростей вводимыми в него электродами. В качестве рабочей среды был использован водный раствор солей  $K_3Fe(CN)_6$  и  $K_4Fe(CN)_6$  с совместной весовой концентрацией 1—2 %, приемников скоростей — одиночные электроды с приемным элементом из платины, имеющим сферическую форму (диаметр 1 мм). Схема соединения приемников скоростей с источником питания и измерительной аппаратурой показана на рис. 1.

В процессе предварительных измерений устанавливался оптимальный режим работы приемников скоростей, т.е. такие условия, при которых становилось возможным получение максимально полезного сигнала при минимальной помехе. Эти условия зависят от рабочего напряжения  $V$  и величины внешней нагрузки  $R$ , устанавливаемых при пропускании электролита через столб песка, в котором помещался приемник скорости. Окончательно для измерений были приняты  $V = 1,3$  В и  $R = 1$  кОм.

Тарировочное устройство приемников скоростей, показанное на рис. 1, состоит из емкости, имеющей в нижней части насадок для отвода жидкости, и помещенной внутри нее прямоугольной трубы сечением 0,1 x 0,1 м. Внизу труба закрыта сеткой. В верхней части трубы имеется сливное отверстие для поддержания постоянного уровня электролита. В трубу засыпался несвязный грунт, в котором помещался приемник скоростей (катод), а вдоль стен трубы закладывались пластины из нержавеющей стали (анод). Песок предварительно тщательно промывался для удаления различных примесей, способных реагировать с электролитом. Электролит подавался в трубу сверху и, пройдя через

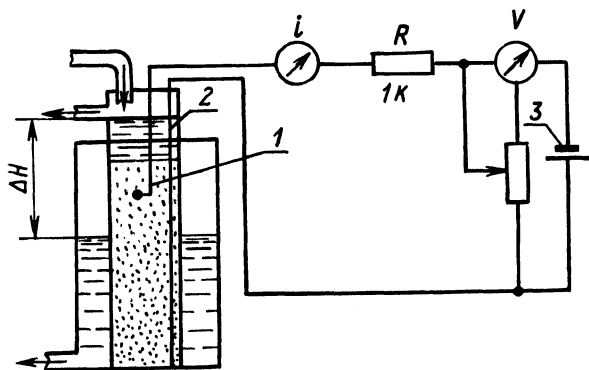


Рис. 1. Тарировочное устройство и схема измерений:  
1 – катод; 2 – анод; 3 – источник питания.

столб песка, попадал в емкость, из которой отводился через насадок. За счет разности отметок уровня жидкости  $\Delta H$  в трубе и емкости, в трубе устанавливалась определенная скорость фильтрации, величина которой рассчитывалась путем деления расхода, определенного на выходе из насадка, на сечение трубы. Расход измерялся объемным способом. При подаче на электроды напряжения между скоростью омывания катода и величиной тока в цепи анод–катод устанавливалось определенное соотношение. Задавая различные значения напора для данного грунта, получим связь между скоростью фильтрации  $U_{\phi}$  и током в цепи  $i = f(U_{\phi})$ , а также между  $U_{\phi}$  и напряжением на выходе измерительной схемы  $U = f(U_{\phi})$ .

Один приемник скорости последовательно устанавливался по глубине грунта в различные точки, а второй постоянно находился в придонной области потока (в точке с наибольшей интенсивностью турбулентности). Сигналы регистрировались на шлейфовом и электронном И-10 осциллографах или же накапливались в МОЗУ системы автоматизации гидравлических исследований [5].

В опытах по измерению нестационарных скоростей в несвязных грунтах при протекании над ними спокойного турбулентного потока уклон лотка равнялся 0,0015, что должно было вызвать в грунтах с коэффициентами фильтрации  $K_{\phi}$  0,0305 м/с; 0,00627 и 0,00184 м/с соответственно скорости фильтрации 0,0000455 м/с, 0,0000094 и 0,00000276 м/с. В действительности измеренные на глубине 0,002 м скорости составили 0,0024 м/с, 0,0006 и 0,0002 м/с. Рас-

четные скорости оказались в 50–70 раз меньше экспериментальных. Это подтверждает тот факт, что в несвязном грунте, подстилающем турбулентный поток, индуцируется течение жидкости, совпадающее с направлением руслового потока.

Анализ измерений нестационарных скоростей в несвязных грунтах различной крупности показал, что осредненные скорости в грунте асимптотически приближаются на глубине к некоторой конечной скорости, не равной нулю.

Особенно резкое затухание пульсаций скорости имеет место в пределах верхнего ряда частиц. Амплитуды пульсаций на уровне низа частиц диаметрами 0,0005 : 0,001; 0,001 : 0,002; 0,002 : 0,003 м; 0,003 : 0,005 м составляют соответственно 0,4 %; 2,2; 2,5; 3,4 % от амплитуд пульсаций на верхних гранях этих же частиц. Глубина проникновения пульсаций зависит от размера пор грунта, подстилающего поток, и пульсаций скорости в придонной области. Наиболее глубоко проникают низкочастотные пульсации, на долю которых приходится максимум энергии в спектре пульсационных составляющих скорости.

Исследования связи между пульсациями скорости в придонной области  $U'$  и грунте  $V'$  показали, что в случае предельного равновесия частиц коэффициент корреляции  $r = U'V' / \sqrt{(U')^2} \sqrt{(V')^2}$  в пределах первых слоев частиц не превышал 0,2. Уже на глубине 2,5  $d' r = 0$ .

На основании полученных результатов можно сделать некоторые выводы о пульсации давлений. Таунсенд [6] отмечает, что, хотя между скоростью и давлением в потоке необязательна прямая связь, давление на самом деле определяется полем скоростей и не является независимой величиной. Поскольку изменения пульсаций скорости на уровне низа частиц незначительны и составляют всего 0,4–3,4 % от пульсаций в придонной области для указанных размеров частиц грунта, можно предположить, что давление на нижние грани частиц остается постоянным и равным статическому. В то же время изменение давления на верхние грани носит стохастический характер, что вызывает в отдельные моменты нарушение их устойчивости за счет рассогласования давления на верхних и нижних гранях. Расчеты с использованием теории турбулентности пристенного слоя Т.Дж.Блэка [7] подтвердили, что взвешивающее усилие за счет рассогласования давления для мелкозернистых грунтов достигает 60 % от веса частиц.

Помимо измерений скоростей в несвязных грунтах, подстилающих спокойный турбулентный поток, были проведены измерения нестационарных скоростей по глубине грунта в створе наибольшего размыва при истечении потока из-под щита. Измерения проводились после того, как воронка размыва приобретала профиль равновесия. Методика аналогична описанной выше. Опыты выполнены с несвязными грунтами диаметром 1,0–2,0 мм; 2,0–3,0; 3,0–5,0 мм. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Обозначения в таблице:  $d_{cp}$  – средний диаметр частиц несвязного грунта;  $y$  – ордината точки измерения в грунте, за плоскость отсчета принята середина верхнего ряда частиц (граница поток–грунт);  $\bar{U}$  и  $U'$  – осредненная скорость и наибольший размах пульсаций скорости в грунте;  $\bar{U}_0$  и  $U'_0$  – осредненная скорость и наибольший размах пульсаций скорости на границе поток–грунт.

Табл. 1. Затухание осредненных скоростей и пульсаций по глубине грунта под воронкой размыва

$d_{cp}$	$\frac{y}{d_{cp}}$	$\frac{\bar{U}}{\bar{U}_0}$	$\frac{U'}{\bar{U}_0}$	$\bar{U}_0$ см/с	$U'_0$ см/с
1,5	0,66	0,456	0,240	1,25	5,7
	1,33	0,344	0,224		
	2,00	0,224	0,164		
	2,66	0,176	0,131		
	3,33	0,12	0,081		
	4,0	0,136	0,047		
	4,67	0,056	0,037		
2,5	0,8	0,385	0,203	2,0	9,0
	1,2	0,325	0,13		
	1,6	0,235	0,12		
	2,0	0,195	0,115		
	2,4	0,135	0,13		
	2,8	0,125	0,11		
	3,2	0,075	0,096		
	4,0	0,50	0,274		
0,75		0,166	0,127		
1,25		0,166	0,11		
1,75		0,126	0,8		
2,25		0,118	0,66		
3,00		0,102	0,34		

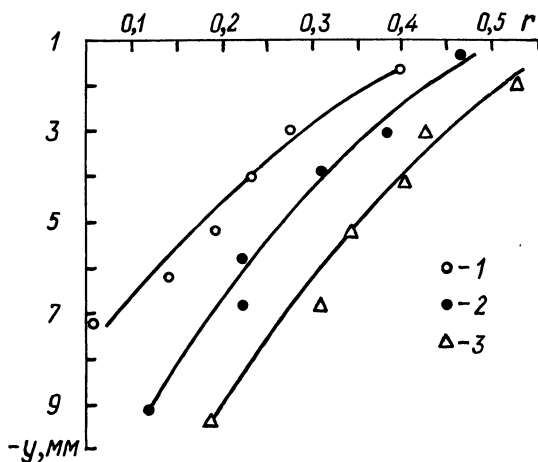


Рис. 2. Изменение коэффициентов взаимной корреляции между пульсациями скоростей в придонной области и в различных точках по глубине грунта под воронкой размыва: 1 -  $d = 0,001 - 0,002$  м; 2 -  $d = 0,002 - 0,003$ ; 3 -  $d = 0,003 - 0,005$  м.

Сопоставление данных с аналогичными, полученными для этих же грунтов, но в условиях, когда они находились под воздействием равномерного потока, показало, что 1) абсолютные значения осредненных скоростей на уровне нижних граней частиц примерно в 2 раза выше, чем в случае равномерных потоков (в обоих случаях имело место предельное равновесие частиц

грунта); 2) пульсации скоростей затухают менее интенсивно и проникают на большую глубину, чем в грунтах, находящихся под воздействием равномерных потоков; 3) коэффициенты взаимной корреляции между пульсациями скорости в придонной области и в грунте возрастают с увеличением интенсивности турбулентности и диаметра частиц грунта.

Последнее свидетельствует о том, что изменение давления на верхних гранях частиц вызывает изменения давления на нижних гранях с меньшим запаздыванием, чем в случае, когда грунт находится под воздействием равномерного потока. А это в свою очередь приводит к снижению взвешивающего усилия, возникающего за счет рассогласования давления. Следовательно, в воронке размыва основную роль в нарушении устойчивости частиц должны играть лобовое и подъемное усилия, возникающие за счет несимметричного обтекания частиц потоком, величина которых определяется мгновенной придонной скоростью в каждой точке воронки размыва.

Результаты исследований позволили дополнить сведения о взаимодействии потока с грунтом и оценить роль взвешивающего усилия, возникающего за счет рассогласования давления на верхних и нижних гранях частиц, в нарушении их устойчивости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В а с и л ь ч е н к о Г.В. Проникновение турбулентного потока в подстилающий его несвязный грунт. — В сб.: Вопросы водохозяйственного строительства. Минск, 1970, с. 131–141.
2. В а с и л ь ч е н к о Г.В., К а л и н о в и ч А.С. Турбулентное течение жидкости на границе с несвязным грунтом. — В сб.: Гидравлика водопропускных сооружений. Гомель, 1973, с. 115–118.
3. К а л и н о в и ч А.С. Исследования взаимодействия турбулентного потока с несвязным грунтом. — В сб.: Комплексное использование водных ресурсов. М., 1974, вып. 2. с. 175–183.
5. В а с и л ь ч е н к о Г.В., Н е л и п о в и ч Н.Б. Прибор для измерения скоростей течения жидкости элетрохим. способом. — Труды координ.совещ. по гидротехнике. Вып. 51, 1969, с. 94–100.
6. Т а у н с е н д А.А. Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. — М., 1959. — 399 с.
7. Б л э к Т.Дж. Некоторые практические приложения новой теории турбулентности пристенного слоя. — В кн.: Достижения в области теплообмена. М., 1970, с. 325–351.

УДК 627.15

Н.В.СУРМА (БПИ)

### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА НИЖНЕГО БЬЕФА ЗА НИЗКОНАПОРНОЙ ВОДОСБРОСНОЙ ПЛОТИНОЙ

Поток, прошедший через плотину, обладает запасом кинетической энергии и воздействует на русло. Для надежной работы плотины предусматривается крепление нижнего бьефа, а иногда и устройство гасителей на нем. Крепление на участке водобоя обычно выполняется из монолитного железобетона, а на участке рисбермы — из сборного.

При проектировании сооружения для правильного выбора устройств нижнего бьефа в каждом конкретном случае необходимы данные о гидравлическом режиме в нижнем бьефе за плотиной, которые, как правило, получают лабораторными исследованиями.