

Для русла с прямоугольным поперечным сечением

$$c_Q = 2v,$$

а для широкого параболического русла

$$c_Q = \frac{3}{2} v.$$

19.5. Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте основные допущения, принимаемые при расчете неустановившегося движения в открытых руслах. Объясните, что такое одномерная задача и укажите особенности рассмотрения движения жидкости в такой постановке.

2. Перечислите виды расчетов, осуществляемых при изучении неустановившегося движения.

3. Приведите примеры неустановившегося движения в открытых руслах.

4. Что такое прямая и обратная волна? Что такое положительная и отрицательная волна?

5. Объясните, как происходит движение прямой волны и обратной положительной волны, а также прямой отрицательной волны и обратной отрицательной волны.

6. Что такое сложные волны, фронт волны, тело волны?

7. Что такое прерывные волны, преломленная и отраженная волны?

8. Запишите дифференциальные уравнения одномерного медленно изменяющегося неустановившегося движения в открытых руслах. Какие допущения приняты при их выводе? Какие из основных уравнений привлекаются при рассмотрении системы дифференциальных уравнений неустановившегося движения?

9. В чем особенности записей уравнений рассматриваемого движения в призматических открытых руслах, в прямоугольном русле? Как записывается уравнение Сен-Венана при наличии бокового притока?

10. Как определяется скорость распространения волны в открытом прямоугольном русле?

11. Как записывается формула Лагранжа?

12. Какие особенности имеют формулы для определения распространения скорости волны в случае отрицательной волны?

Глава 20

ДВИЖЕНИЕ НАНОСОВ В ОТКРЫТЫХ ПОТОКАХ

20.1. Гидравлическая крупность наносов

Твердые частицы грунта, переносимые водными потоками, — **наносы** — условно делят на **в л е к о м ы е** по дну, или **д о н н ы е**, и **в з в е ш е н н ы е**.

В руслах наносы создаются за счет смыва грунта водой, стекающей в эти русла, и размыва русла на отдельных его участках. Часть наносов попадает в русло благодаря переносу их ветром.

Наносы бывают различной крупности и формы. Более крупные наносы чаще имеют форму, близкую к шару или эллипсоиду. Мел-

кие наносы имеют неправильную геометрическую форму, близкую к форме пластинок.

Для характеристики формы частиц наносов предложено несколько способов. Имеются специальные эталоны (трафареты), на которых приводятся наиболее характерные очертания частиц. Применяются также различные коэффициенты формы, например по В. В. Романовскому критерий формы частицы

$$\Theta = d^2/ab,$$

где d — диаметр шара, объем которого W равен объему частицы; a , b — длина и ширина частицы.

Для шара, естественно, $\Theta = 1$, для очень плоских частиц $\Theta = 0,5$.

Диаметр равновеликого шара определяется по формуле

$$d = \sqrt[3]{6W/\pi}.$$

Для частиц, кроме очень плоских, диаметр шара, равновеликого частице, можно находить как

$$d = (a + b + c)/3,$$

где a , b , c — длина, ширина и высота (толщина) частицы.

Наносы обычно характеризуются средним диаметром, который устанавливается на основании анализа зернового состава.

Важную роль в изучении условий движения наносов играет гидравлическая крупность ω , представляющая собой скорость равномерного падения частицы наносов в неподвижной воде [см. гл. 16].

Связь между размером частицы и скоростью ее падения в неподвижной воде можно установить следующим образом. Пусть твердая частица тяжелее воды и имеет форму шара, тогда, если ее опустить в воду, она будет падать под действием силы

$$G = \frac{1}{6} \pi d^3 g (\rho_{\text{ч}} - \rho), \quad (20.1)$$

где d — диаметр частицы; g — ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы наносов; ρ — плотность воды.

Падению частицы в жидкости будет оказывать сопротивление сила P .

При направлении оси OX , совпадающем с направлением движения, и симметричном обтекании (частица падает вдали от стенок сосуда) силу сопротивления можно выразить в виде

$$P = C_x \omega_x \rho u^2 / 2, \quad (20.2)$$

где C_x — коэффициент силы сопротивления, т. е. коэффициент лобового сопротивления; ω_x — площадь проекции наибольшего поперечного сечения частицы на направление, нормальное к направлению движения; u — скорость относительного движения частицы в воде.

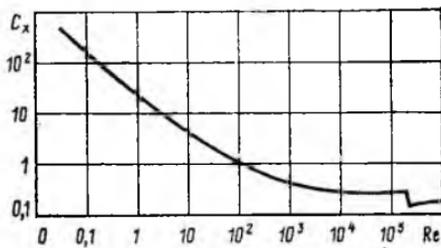


Рис. 20.1

Коэффициент лобового сопротивления C_x при симметричном обтекании частиц зависит от числа Рейнольдса $Re = ud/\nu$ и формы частиц. На рис. 20.1 показана зависимость C_x от Re при симметричном обтекании шара. При $Re < 1$ коэффициент C_x обратно пропорционален числу Re , т. е. $C_x = 24/Re$. Соответственно сила P пропорци-

ональна скорости в первой степени (ламинарный режим обтекания).

Для частицы шарообразной формы (в условиях ламинарного режима обтекания при $Re < 1$) сила сопротивления определяется формулой Стокса, получаемой из дифференциальных уравнений движения вязкой жидкости,

$$P = 3\pi\mu\omega d,$$

где μ — динамическая вязкость жидкости.

При равномерном падении в воде частиц и $Re < 1$ из равенства P и G имеем

$$\omega = gd^2 \frac{\rho_{\text{ч}} - 1}{18\nu}, \quad (20.3)$$

где ν — кинематическая вязкость воды.

Опыты подтверждают справедливость этой зависимости для частиц диаметром $d < 0,05$ мм.

При $Re \approx 10^4 + 2 \cdot 10^5$ коэффициент C_x шара не зависит от Re (автомодельная область) и сила P зависит от квадрата скорости (квадратичная область). При промежуточных значениях Re сила P зависит от скорости в степени меньше двух.

Для частиц наносов квадратичная область обтекания наступает при $Re \approx 500$.

В квадратичной области гидравлическая крупность не зависит от кинематической вязкости воды (от температуры) при прочих равных условиях. При ламинарном режиме обтекания гидравлическая крупность не зависит от формы частиц наносов.

В табл. 20.1 приведены значения гидравлической крупности при $t_{\text{ж}} = 15$ °С, $\rho_{\text{ч}} = 2650$ кг/м³ для различных значений $d_{\text{ср}}$ и Θ .

При $d_{\text{ср}} < 1,5$ мм к значениям гидравлической крупности ω , взятым из табл. 20.1, даются в зависимости от температуры воды соответствующие поправочные коэффициенты (табл. 20.2).

Наносы состоят из частиц различных диаметров, т. е. из разных фракций, обладающих различной гидравлической крупностью. При-

Таблица 20.1

Область сопротивления	$d_{\text{ср}}, \text{ мм}$	Значения ω при Θ				
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
Квадратичная	100	2,16	1,86	1,55	1,24	0,94
	80	1,94	1,66	1,39	1,12	0,84
	50	1,53	1,32	1,1	0,88	0,67
	30	1,18	1,02	1,85	0,68	0,52
	20	0,96	0,83	0,69	0,56	0,42
	15	0,84	0,72	0,6	0,48	0,37
	10	0,68	0,59	0,49	0,39	0,3
	7	0,57	0,49	0,41	0,33	0,25
	5	0,48	0,42	0,35	0,28	0,21
	3	0,38	0,32	0,27	0,22	
	2,5	0,34	0,29	0,25		
	2	0,31				
	Переходная	3				
2,5					0,2	0,15
2			0,26	0,21	0,17	0,13
1,5		0,24	0,2	0,17	0,14	0,11
1		0,16	0,14	0,12	0,1	0,09
0,5		0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
0,3		0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
0,2		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,1		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ламинарный режим		0,05			0,00195	
	0,04			0,00125		
	0,03			0,0007		
	0,02			0,00031		
	0,01			0,000078		
	0,005			0,00002		
	0,002			0,0000031		
	0,001			0,00000078		

нито характеризовать наносы средневзвешенной гидравлической крупностью.

Для вычисления гидравлической крупности наносы делят на несколько (четыре-пять) групп зерен одной крупности и для каждой из них определяют ω как среднеарифметическое значение

$$\omega = \frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_2)$$

или как среднегеометрический параметр

$$\omega = \frac{1}{3} (\omega_1 + \omega_2 + \sqrt{\omega_1 \omega_2}),$$

где ω_1 и ω_2 — гидравлические крупности для крайних значений диаметров частиц в данной фракции (по табл. 20.1).

Таблица 20.2

$d_{\text{ср}}, \text{ мм}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$				
	0—2	3—7	8—12	13—17	18—22
1,5	0,92	0,94	0,97	1	1,04
1	0,83	0,87	0,93	1	1,07
0,5	0,74	0,81	0,9	1	1,11
0,2	0,69	0,77	0,88	1	1,13
0,1	0,67	0,76	0,87	1	1,14
0,05	0,66	0,75	0,87	1	1,14

По гидравлической крупности отдельных фракций вычисляют средневзвешенную гидравлическую крупность наносов:

$$w_{\text{ср}} = 0,01 \sum w_i p_i, \quad (20.4)$$

где p_i — процентное содержание частиц определенной крупности (по массе).

20.2. Движение наносов

Деление наносов на донные и взвешенные является, как указывалось выше, условным.

Донные наносы. Рассмотрим движение частиц несвязного грунта. Одна и та же частица наносов может передвигаться, перекатываясь по дну (влечение по дну), или скачками (сальтация частицы), чередуясь с перекатыванием по дну, и тогда ее можно считать в числе донных наносов. Но эта же частица при соответствующих условиях может перейти во взвешенное состояние.

При переходе частиц от неподвижного состояния к движению наблюдаются их первые подвижки и раскачивания: некоторые частицы смещаются и перекатываются по дну, другие отрываются от дна и скачками переносятся вниз по течению. При дальнейшем увеличении скорости потока число перемещающихся частиц увеличивается.

Скорость воды, при которой начинается трогание частиц с места, называют сдвигающей скоростью $v_{\text{сдв}}$. При увеличении скорости потока выше определенных значений на дне потока могут образоваться песчаные рифели, гряды (см. рис. 8.6).

С дальнейшим повышением скорости потока растут длина и высота песчаных волн, а также крутизна их низового откоса. Двигающиеся в поверхностном слое песчаной волны частицы, достигая ее гребня, скатываются вниз, в подвалье, в зону водоворотов.

Рассмотрим механизм воздействия потока жидкости на твердые частицы, лежащие на дне (рис. 20.2). Ось OX совпадает с направле-

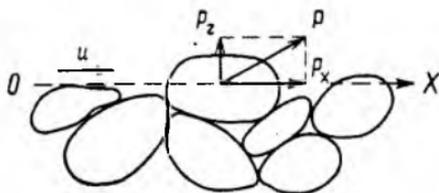


Рис. 20.2

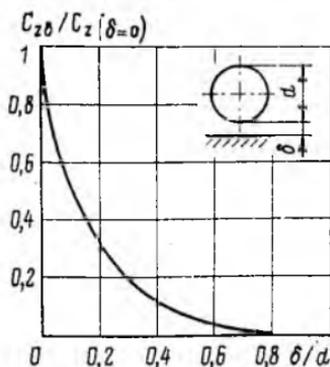


Рис. 20.3

нием потока воды. Лежащая на дне частица подвергается воздействию потока, которое в общем случае может быть представлено шестью компонентами. Три из них — проекции сил P_x , P_y , P_z и три — соответствующие моменты M_x , M_y , M_z .

Проекции сил определяются по формулам, аналогичным формуле (20.2). Различие заключается лишь в коэффициентах сил.

Чаще всего обтекание частиц на дне рассматривается в условиях, когда на частицу действуют лишь две составляющие силового воздействия P_x и P_z . Сила P_z является поперечной (подъемной). Под влиянием этих сил частица при известных условиях может оторваться от дна. Наблюдения за отрывом песчаных частиц показали, что осредненное значение угла наклона траектории отрывающейся частицы к дну составляет примерно 25° .

Подъемная сила по мере удаления частицы от дна уменьшается. При увеличении расстояния от дна δ примерно до $0,8 d$ (рис. 20.3) коэффициент подъемной силы шаровидных и цилиндрических частиц согласно экспериментальным данным М. А. Дементьева и Д. В. Штеренлихта уменьшается до нуля.

Механизм отрыва частиц от дна весьма сложен. В переднем нижнем квадранте при обтекании частицы действуют силы, превышающие гидростатическое давление, а в нижней (по потоку) кормовой части частицы — разрежение. Наблюдаются интенсивные пульсации вертикальной и горизонтальной составляющих скорости вблизи дна, соударения частиц, трение и зацепление частиц на дне, фильтрация воды нормально к дну (вверх или вниз).

Из анализа предельного состояния устойчивости частицы на дне Ц. Е. Мирцхулава получил приведенные в гл. 16 формулы для допустимой (неразмывающей) скорости. Допустимая средняя скорость $v_{\text{доп}}$ примерно на 40 % превышает сдвигающую среднюю скорость $v_{\text{сдв}}$.

Движение наносов в каналах и реках происходит при взаимном влиянии частиц.

Размыв связных грунтов — еще более сложное явление, чем размыв песчаных грунтов, вследствие действия сил сцепления между твердыми частицами.

Взвешенные наносы. Приподнятая над дном частица может перемещаться вверх под действием вертикальной составляющей скорости потока u_z , если эта составляющая больше гидравлической крупности частицы w . Изменение u_z вследствие пульсации на $\pm u'_z$ приводит к непрерывным подъемам и опусканиям частицы, которая одновременно вместе с массой жидкости будет поступательно перемещаться.

Средняя скорость потока, при которой начинается переход наносов во взвешенное состояние, представляет собой наименьшую среднюю скорость, при которой взвешенные наносы не выпадают. Эту среднюю скорость называют также *незаиляющей скоростью* $v_{нез}$ (см. также § 16.4).

При малой мутности (концентрации взвешенных наносов, т. е. содержании частиц в единице объема воды) потока, которая наблюдается в ряде рек, взвешивание и транспортирование наносов во взвешенном состоянии будет зависеть в основном от отношения вертикальной составляющей скорости, непрерывно изменяющейся вследствие пульсации, к гидравлической крупности наносов.

Е. А. Замарин предложил формулу, составленную по натурным данным для условий, когда мутность потока $\rho = 5 \text{--} 6 \text{ кг/м}^3$:

$$\rho = 0,022 \frac{v}{w_0} \sqrt{\frac{RJv}{w_{cp}}}, \quad (20.5)$$

где v — средняя скорость движения воды, м/с; R — гидравлический радиус, м; J — уклон свободной поверхности потока (при равномерном движении — уклон дна); w_{cp} — средневзвешенная гидравлическая крупность наносов, подсчитанная как среднегеометрическая, м/с; w_0 — условная гидравлическая крупность, которая имеет следующие значения:

$$\text{при } 0,002 \leq w_{cp} \leq 0,008 \text{ м/с } w_0 = w_{cp};$$

$$\text{при } 0,0004 \leq w_{cp} \leq 0,002 \text{ м/с } w_0 = 0,002.$$

Из формулы (20.5) получим незаиляющую скорость:

$$v_{нез} = \sqrt[3]{\left(\frac{\rho w_0 \sqrt{w_{cp}}}{0,022 \sqrt{RJ}}\right)^2}. \quad (20.6)$$

20.3. Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды наносов?
2. Влияет ли форма наносов на гидравлическую крупность?
3. Запишите формулу для силы сопротивления, действующей на тело при его движении.

4. Зависит ли коэффициент лобового сопротивления от каких-либо факторов или он всегда постоянен?
5. Каким образом определяется из формулы Стокса гидравлическая крупность?
6. Какие режимы обтекания и области сопротивления наблюдаются при движении наносов в русле? Как определяется средняя гидравлическая крупность для наносов, состоящих из нескольких групп зерен отдельной крупности?
7. Каковы особенности движения донных наносов?
8. Какие силы действуют на частицу? Как происходит процесс перемещения частиц?
9. Как определяется незаиляющая скорость в открытом русле?

Глава 21

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ПРЫЖОК

21.1. Общие сведения

В гл. 17 при анализе кривых свободной поверхности неравномерного плавного изменяющегося потока в открытых руслах было отмечено, что при $h = h_{кр}$ и $\Pi_k = 1$ функция $h = f(l)$ претерпевает разрыв непрерывности. При этом $dh/dl = \infty$, т. е. касательная к кривой свободной поверхности нормальна к линии критических глубин.

В данной главе рассматривается лишь случай, когда глубина увеличивается, т. е. происходит переход из бурного состояния в спокойное.

При этом на относительно коротком участке русла происходит резкое скачкообразное увеличение глубины потока. Это явление называется гидравлическим прыжком, который является единственной формой перехода потока из бурного состояния в спокойное. Гидравлический прыжок представляет собой один из примеров резко изменяющегося движения.

Гидравлический прыжок можно рассматривать как остановившуюся волну перемещения. Если, например, поток, находящийся в бурном состоянии, внезапно преградить, уровень воды перед преградой резко повысится (рис. 21.1). Создастся волна, которая будет распространяться вверх по течению (обратная положительная волна). Высота и скорость перемещения волны будут постепенно уменьшаться вверх по течению. При скорости волны c_0 , равной средней скорости u , волна остановится и примет форму гидравлического прыжка. Такое возможно только в потоке, находящемся в бурном состоянии ($\Pi_k > 1$). Если поток находится в спокойном состоянии ($\Pi_k < 1$), волна по мере удаления вверх по течению постепенно будет затухать, кривая свободной поверхности перед препятствием останется непрерывной, плавной. Гидравлический прыжок образуется при обтекании потоком, находящимся в бурном