

Ординаты этой эпюры могут быть установлены на основании соответствующих эмпирических данных (см. например. СН-57-75).

В заключение необходимо отметить, что дальнейшее развитие, а также соответствующие указания о практическом применении теории волн освещаются в ряде специальных курсов (в курсе «Гидротехнические сооружения», курсе «Порты и портовые сооружения» и др.).

Существенными вопросами, которых мы выше вовсе не касались, являются, во-первых, вопрос о распространении волн в пределах акваторий, защищаемых со стороны моря соответствующими оградительными сооружениями, и, во-вторых, вопрос о так называемой переработке берегов волнами (в результате которой берег, образованный, например, песчаным грунтом и не покрытый каким-либо креплением, получает определенное очертание после размыва его волнами). Что касается вопроса о волновом давлении на различные сооружения, то практически этот вопрос в большинстве случаев решается на основании различных приближенных соображений, основанных отчасти на чисто эмпирических данных, отчасти же на данных теории Герстнера, причем исходными расчетными параметрами здесь являются только величины h и λ (устанавливаемые, как было отмечено выше, при помощи эмпирических зависимостей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 19-1. Богомолов А. П., Михайлов К. А. Гидравлика. — М.: Стройиздат. 1972.
19-2. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) Нормы проектирования. СН-57-75. — М.: Стройиздат, 1975.
19-3. Порты и портовые сооружения/Н. Н. Джунковский А. А. Каспарсон. Г. Н. Смирнов и др. — М.: Стройиздат. ч. I. 1964; ч. II. 1967.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ¹

ДВУХФАЗНЫЕ ПОТОКИ ЖИДКОСТИ

§ 20-1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ УКАЗАНИЯ.

ЗАМЕЧАНИЯ О НЕНЬЮТОНОВСКИХ И АНОМАЛЬНЫХ ЖИДКОСТЯХ

Двухфазными (бифазными) потоками жидкости обычно называют потоки, содержащие: а) или частицы твердого тела, находящиеся во взвешенном состоянии; удельный вес твердого тела здесь может быть как больше, так и меньше удельного веса жидкости; б) или капли другой более легкой или более тяжелой жидкости; в) или, наконец, пузыри газа, в частности, пузыри, заполненные воздухом или парами данной жидкости.

С двухфазными потоками жидкости в практике гидротехнического строительства приходится встречаться достаточно часто, например при рассмотрении потоков воды, содержащих взвешенные частицы грунта (так называемые взвешенные наносы) или кристаллы льда, шугу, или при рассмотрении потоков воды, содержащих пузыри воздуха (азрированных потоков), и т. п. Двухфазные потоки получаются в случае гидротранспорта, когда транспорт, например, грунта осуществляется методами гидромеханизации.

Иногда двухфазные, так же как и некоторые однофазные (см. § 1-2) и многофазные потоки, могут представлять собой потоки:

1) или так называемой неньютоновской жидкости, для которой продольные касательные напряжения трения τ выражаются (для прямолиней-

¹ Данная глава составлена при участии М. Я. Крупника.

ного потока) не зависимостью Ньютона (4-24), а зависимостью вида:

$$\tau = \eta \left(\frac{du}{dn} \right)^k, \quad (20-1)$$

где k — число, отличное от единицы, остальные обозначения см. в § 4-3;

2) или так называемой аномальной жидкости,¹ для которой τ выражается:

а) или зависимостью Бингама:

$$\tau = \tau' + \eta \frac{du}{dn}, \quad (20-2)$$

б) или более общей зависимостью Шведова:

$$\tau = \tau' + \eta \left(\frac{du}{dn} \right)^k. \quad (20-3)$$

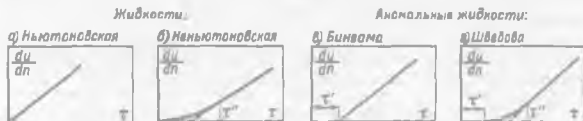


Рис. 20-1. Характеристики неполных воображаемых моделей «жидких тел»

Как видно из зависимостей (20-2) и (20-3), относящихся к движущейся жидкости, аномальные жидкости в отличие от обычных жидкостей (см § 1-2) в состоянии покоя могут иметь касательные напряжения τ меньшие или равные некоторой величине τ' .

На рис. 20-1, а-г представлены зависимости

$$\tau = f \left(\frac{du}{dn} \right) \quad (20-4)$$

для ньютоновской жидкости (см. схему а), которую мы имели в виду выше при рассмотрении ламинарного режима [см. формулу (4-24)]; для неньютоновской жидкости (см. схему б); для аномальной жидкости Бингама (см. схему в); для аномальной жидкости Шведова (см. схему г).

Далее не будем касаться аномальных жидкостей, для расчета движения которых разработаны специальные теории, основанные на использовании зависимостей (20-2) и (20-3). Рассмотрим только потоки воды, подчиняющиеся зависимости Ньютона (4-24), причем будем иметь в виду только такие потоки воды, которые содержат во взвешенном состоянии тяжелые твердые частицы, например, частицы грунта.

Важно здесь еще подчеркнуть следующее обстоятельство. Все приведенные выше рассуждения, а также графики на рис. 20-1 относятся только к жидкостям, которые могут рассматриваться с «позиций Ньютона» т.е. с позиций модели, описываемой зависимостью (4-24). Вместе с тем, как мы видели, при рассмотрении грунтовых вод (см. гл. 17 и 18) используется другая модель — «модель Дарси». Естественно, что к «жидкости Дарси» приведенные выше рассуждения не могут быть отнесены. Жидкость Дарси (с учетом, в частности, так называемого начального градиента) должна описываться графиками иного вида, здесь не приводимыми.

¹ Примером потоков аномальной жидкости могут являться так называемые селевые потоки.

Зависимость Ньютона (4-24) была дана нами в § 4-3 только для ламинарного режима. Вообще говоря, обобщенный закон Ньютона (упомянутый в сноске на стр. 136) справедлив и для турбулентного движения воды, если мы будем иметь в виду поле актуальных скоростей. Что касается модели осредненных скоростей (модели Рейнольдса — Буссинеска), которой для расчета заменяют действительный турбулентный поток, то здесь, как видно из формул (4-55) и (4-56), мы, после такой замены, получаем модель ньютоновской жидкости, характеризуемой показателем степени $k = 2,0$ [см. формулу (20-1)].

Надо подчеркнуть следующее важное обстоятельство, которое всегда необходимо иметь в виду. Как правило, действительные явления настолько сложны, что они непосредственно не поддаются соответствующей математической обработке. Поэтому и приходится, как то отмечалось в гл. 16, пользоваться «воображаемыми моделями» (или иначе «идеальными телами» или «идеальными процессами»),¹ которыми мы предварительно заменяем действительное явление или действительное тело. Именно такими воображаемыми моделями (или идеальными телами) и являлись: идеальная жидкость, поясненная в § 1-3; упомянутая модель Буссинеска; модель Бернадского (см. гл. 15) и модель Форхгеймера (см. гл. 17); ньютоновская и неньютоновская жидкости; жидкости Бингама и Шведова и т. п.

При исследовании того или иного явления всегда необходимо себе представлять ту воображаемую модель, непосредственно подвергаемую математической обработке, которой мы предварительно заменили действительное явление (или тело).

Механическую смесь частиц грунта с водой часто называют гидросмесью; потоки такой смеси называют взвесенесушными потоками; при весьма большом содержании частиц грунта в воде получаем гидросмесь, иногда называемую пульпой.

При изучении взвесенесушных потоков приходится различать:

а) русла, поддающиеся размыву, т. е. русла, которые при определенных скоростях воды могут размываться и могут насыщать поток взвешенными частицами грунта;²

б) русла, вовсе неподдающиеся размыву, например, русла, покрытые бетонной одеждой; в таких руслах вначале может происходить только осаждение (выпадение) наносов из воды, причем эти русла могут только заливаться.

Грунты, образующие русло, вообще говоря, могут быть:

а) или связными, когда между отдельными частицами грунта имеется сцепление (частицы грунта как бы склеены одна с другой); примером таких грунтов является глина;

б) или несвязными (сыпучими), т. е. лишенными сил сцепления; примером таких грунтов является песок, гравий и т. п.

Далее будем иметь в виду только несвязные (песчаные) грунты.

Песчаный грунт всегда является разнозернистым. Гранулометрический состав фракций разнозернистого песка представляют соответствующей кривой (рис 17-9), которая строится на основании специально проведенных опытов с данным грунтом.

Скорость равномерного падения одной тяжелой твердой частицы в достаточно большом объеме покоящейся воды называется гидравлической крупностью данной частицы. Эта скорость, обозначаемая далее через w_0 , зависит от геометрической формы и размеров частицы и удельного веса образующего ее вещества, а также от вязкости воды. Величину w_0 определяют

¹ Идеальными в том смысле, что такие тела или процессы в природе не существуют.

² Можно различать еще и русла, поддающиеся размыву, за счет которого поток чистой воды не насыщается взвешенными частицами грунта и, следовательно, остается невзвесенесушим; деформация русла в этом случае происходит за счет движения только так называемых доинных наносов (см. конец § 20-3).

экспериментально. Практически часто считают, что относительная скорость перемещения (падения) тяжелой твердой частицы по отношению к движущейся воде, т.е. вертикальная проекция относительной (по отношению к воде) скорости движения частицы, также равна w_0 .

Рассматривая взвесенесущие потоки, приходится решать следующие задачи, имеющие большое практическое значение:

1) определять величину потерь напора при движении гидросмеси, имеющей различную степень насыщения ее наносами (тяжелыми твердыми частицами);

2) оценивать размывающую способность потока, т.е. выяснять возможность размыва русла, а также устанавливать скорость и предельную величину этого размыва;

3) решать различные вопросы, связанные с гидротранспортом грунта: устанавливать количество грунта, которое может транспортировать данный поток; отыскивать предельную («незаиляющую») скорость. при уменьшении которой начинается интенсивное заиливание русла, так как транспорт всего взвешенного грунта делается невозможным.

4) оценивать заиляющую способность потока, т.е. выяснить возможность и скорость заиливания данного русла за счет выпадения частиц грунта из взвесенесущего потока.

С отмеченными выше задачами 2) и 3), в частности, встречаемся:

а) при проектировании так называемых отстойников, т.е. специальных бассейнов, устраиваемых для отстоя воды в них (с целью очистки воды от взвешенных наносов);

б) при проектировании плотин, мостовых опор и т.п., за которыми могут возникать так называемые местные размывы русла реки (а иногда и местные заиливания его);

в) при анализе перестроения (деформаций) русла рек, когда приходится сталкиваться с «обшир» их размывом или заиливанием (простирающимся на большую длину потока);

г) при анализе заиливания искусственно созданных водоемов (водохранилищ) и т.п.

§ 20-2. МЕХАНИЧЕСКОЕ (СИЛОВОЕ) ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКА НА НЕПОДВИЖНЫЕ ЧАСТИЦЫ ГРУНТА, ЛЕЖАЩИЕ НА ДНЕ РУСЛА И ОБТЕКАЕМЫЕ ВОДОЙ

Представим на рис. 20-2, а некоторую неподвижную твердую частицу A , лежащую на дне русла. Данную частицу будут «опоясывать» соответствующие линии тока движущейся воды, причем ясно, что, в частности, за счет потерь напора на пути abc гидродинамическое давление p с верховой стороны частицы будет больше, чем с ее нижней стороны (см. на рисунке воображаемые пьезометры Π , показывающие разность высоты давлений Δh). Ясно, что в общем случае поверхность частицы A будет подвержена действию неравномерно распределенного гидродинамического давления p (рис. 20-2, б), в связи с чем мы можем представить геометрическую сумму элементарных сил нормального давления воды на поверхность частицы A в виде одного наклонного вектора P_n .

Помимо нормальных давлений p , на поверхность частицы будут действовать еще касательные силы трения интенсивностью τ (рис. 20-2, в). Эти силы можно заменить одним вектором $P_{тр}$. Складывая два вектора P_n и $P_{тр}$ физическая природа которых ясна из сказанного выше, получим одну силу P (рис. 20-2, г). Эта сила P и является силой механического воздей-

ствия потока воды на данную твердую неподвижную частицу. Очевидно, величина и направление силы P зависят от формы и размеров данной частицы, а также от условий движения воды в ее районе в рассматриваемый момент времени.

Наблюдая множество частиц грунта (песка), лежащих на дне русла и имеющих различную форму и размеры, а также разные условия обтекания их водой, можем видеть, что каждая частица будет подвергаться воздействию своей силы P . Для некоторых частиц сила P в данный момент времени будет иметь вертикальную составляющую P_v , направленную вниз, причем такие частицы в рассматриваемый момент времени будут прижиматься потоком к дну.

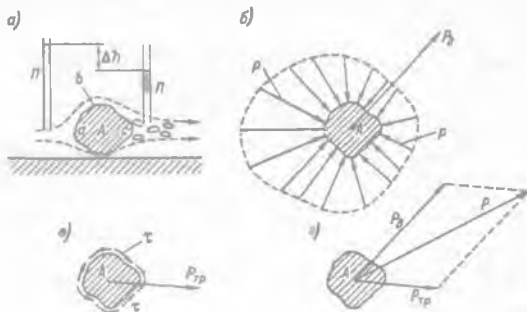


Рис. 20-2. Схема механического воздействия потока на неподвижное обтекаемое твердое тело

Для других же частиц вертикальная составляющая P_v силы P в данный момент времени будет направлена вверх и представлять собой так называемую подъемную силу. Очевидно, когда для той или другой частицы грунта подъемная сила P_v окажется большей ее собственного веса G ¹

$$P_v > G, \quad (20-5)$$

и если продолжительность действия указанной вертикальной составляющей будет достаточно велика, то эта частица может оторваться от дна и попасть в придонный слой потока.

§ 20-3. МЕХАНИЗМ НАСЫЩЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ТЯЖЕЛЫМИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ (ЧАСТИЦАМИ ГРУНТА, ПЕСЧИНКАМИ)

Выше было отмечено, что песчинки, лежащие на дне русла, в результате воздействия на них движущейся воды, могут попасть в нижний (придонный) слой потока.

В случае ламинарного движения воды твердая частица с гидравлической крупностью w_0 (см. § 20-1), попав в поток, выпадет на дно несколько

¹ Силу сцепления между частицами грунта не учитываем, так как имеем в виду только песчаный грунт.

ниже по течению; она будет переноситься потоком со скоростью, равной его продольной скорости, и оседать под действием силы тяжести со скоростью w_0 . Как видно, при ламинарном движении насыщение потока тяжелыми¹ твердыми частицами (песчинками), поднимающимися со дна, невозможно;² однако некоторое перемещение таких частиц по дну (вниз по течению) может наблюдаться.

Иная картина получается при турбулентном движении. Как известно (см. § 4-6), турбулентный поток отличается от ламинарного, в частности, наличием поперечных пульсационных скоростей w'_x . Эти пульсационные скорости обуславливают следующую картину перемещения в толще потока песчинок, оторвавшихся от дна русла.

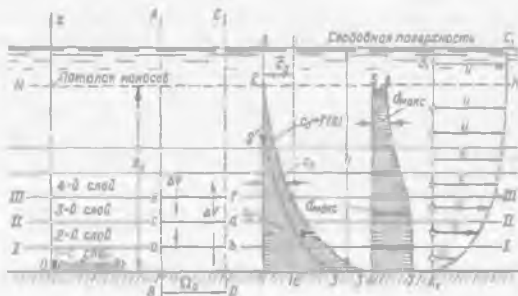


Рис. 20-3. Механизм насыщения потока тяжелыми твердыми частицами

$A_1 - B_1 - C_1$ — эпюра средних продольных скоростей; 1-2-3-1 и 1-2'-3'-1 — эпюры местной предельной (предельно возможной) концентрации c_0 твердой фазы; 4-5-6-7 — эпюра зависимости максимального диаметра взвешенных частиц d_{\max} от координаты z

Представим на рис. 20-3 продольный разрез вертикальной плоскостью турбулентного потока чистой воды. Разобьем этот поток сечениями I-I, II-II, III-III, ... на ряд элементарных слоев, параллельных дну (см. на рисунке слои: 1, 2, 3, ...). Будем считать, что рассматриваемое русло образовано песчаным грунтом, а следовательно, оно является руслом, поддающимся размыву.

Предположим, что с некоторой площади дна величиной Ω_0 (ограниченной вертикальными сечениями A-B и C-D) за определенный отрезок времени Δt в область 1-го (придонного) слоя поступило (в силу причин, описанных в § 20-2) некоторое количество песчинок (например, 1000 штук).

Далее для удобства пояснений представим себе, что продольные скорости движения воды отсутствуют (причем движение наносов, называемых доинными, также отсутствует); имеют место только поперечные пульсационные скорости

¹ Т. е. образованными материалом, имеющим удельный вес, больший удельного веса воды.

² Как здесь, так и ниже мы не имеем в виду явления диффузии, обусловленного броуновским движением, за счет которого мельчайшие твердые тяжелые частицы (размером менее нескольких микронов) могут перемещаться в движущейся и покоящейся жидкости.

u'_z . Рассматривая такую условную схему, выделим на поверхности $I-I$ отделивающей 1-й слой потока от 2-го, площадь ab , равную площади дна Ω_0 . Очевидно, по истечении некоторого небольшого отрезка времени одна часть отмеченных выше 1000 песчинок со скоростью¹

$$u'_z \downarrow = u'_z \downarrow + w_0 \quad (20-6)$$

упадет обратно на дно; другая же часть (меньшая) со скоростью

$$u'_z \uparrow = u'_z \uparrow - w_0 \quad (20-7)$$

пройдет через сечение $a-b$ и попадет во 2-й слой потока; разумеется, такое перемещение вверх могут иметь только мелкие песчинки, для которых направленная вверх пульсационная скорость $u'_z \uparrow$ окажется (в данный момент времени) большей, чем величина гидравлической крупности w_0 , относящейся к этим частицам.²

После этого мы можем аналогично рассмотреть площадь cd , отделивающую 2-й слой от 3-го, и в результате убедиться, что некоторое (вообще говоря, малое) количество песчинок (из указанных выше 1000 штук) должно будет в последующий момент времени попасть, в связи с наличием скорости $u'_z \uparrow$, из 2-го слоя в 3-й слой и т. д.³

Таким образом видим, что, благодаря действию поперечных пульсационных скоростей u'_z , турбулентный поток с течением времени (при наличии русла, поддающегося размыву) будет постепенно насыщаться песчинками на все большую и большую высоту z . Этот процесс насыщения турбулентного потока песчинками должен продолжаться до определенного предела, после которого степень насыщения потока песчинками, поднимающимися со дна русла, стабилизируется.

В течение рассмотренного периода насыщения потока песчинками до указанного предела стабилизации степени насыщения потока будем иметь следующее:

а) для произвольно взятого сечения, например сечения $a-b$ (рис. 20-3), объем фазы, проходящей через это сечение вверх (в течение некоторого времени Δt), будет больше объема твердой фазы, проходящей (за то же время Δt) через это сечение вниз; объемы же гидросмеси ΔV , проходящие за время Δt вверх и вниз через сечение $a-b$, разумеется, будут одинаковы: $\Delta V \uparrow = \Delta V \downarrow$ (в противном случае было бы нарушено известное уравнение неразрывности); как видно, в течение периода насыщения объемы $\Delta V \uparrow$ внутри себя должны нести большие объемы твердой фазы, чем соответствующие объемы гидросмеси $\Delta V \downarrow$;

б) объемы твердой фазы $Ts \uparrow$, отрывающейся от дна русла и поступающей в поток, будут больше объемов твердой фазы $Ts \downarrow$, которая под действием скоростей $u'_z \downarrow$ [см. формулу (20-6)] будет выпадать из потока и ложиться снова на дно русла ($Ts \uparrow > Ts \downarrow$); в связи с этим поверхность дна в период насы-

¹ С тем чтобы не усложнять описание рассматриваемой качественной картины, пренебрегаем здесь (и ниже) инерцией песчинок и полагаем, что время воздействия скоростей u'_z на данные песчинки достаточно продолжительно (в связи с чем в течение этого времени рассматриваемые песчинки успевают пройти путь, равный толщине выделенных элементарных слоев).

² См. предыдущую сноску.

³ При рассмотрении подняемого вопроса надо учитывать, что в данный момент времени в одних точках, например, площади ab (рис. 20-3) пульсационные поперечные скорости u'_z направлены вниз, в других же точках этой же площади ab (в тот же момент времени) скорости u'_z направлены вверх.

щения потока песчинками должна опускаться: в этот период будет происходить размыв русла.

После того, как степень насыщения потока стабилизировалась, получаем иные условия: в течение времени Δt объемы гидросмеси ΔV , а также объемы твердой фазы ($Tв$), проходящие вверх и вниз через произвольно взятое горизонтальное сечение $a-b$ (или $c-d$ и т. п.; рис. 20-3), оказываются одинаковыми ($Tв\uparrow = Tв\downarrow$); объем твердой фазы, поднимаемой потоком со дна, получается равным объему твердой фазы, выпадающей из потока на дно; при этом размыв песчаного русла должен прекратиться (хотя бы средняя скорость потока v была весьма велика): поверхность дна русла должна принять стабильное положение.

После стабилизации степени насыщения потока песчинками концентрация c_0 песчинок, находящихся в потоке, всегда должна уменьшаться по направлению от дна к свободной поверхности (см. эпюру 1-2-3 изменения концентрации песчинок с изменением z).¹

Положение о том, что при одинаковых объемах твердой фазы, проходящих вверх и вниз через некоторое горизонтальное сечение $a-b$ (т.е. при условии, что $Tв\uparrow = Tв\downarrow$), мы будем иметь разные концентрации в верхнем и нижнем слоях потока, можно доказать, исходя из следующих соображений (самого доказательства здесь не приводим).

Все тяжелые песчинки, находящиеся в толще потока, все время движутся по отношению к воде вертикально вниз с относительной скоростью w_0 , поэтому:

а) объемы гидросмеси $\Delta V\uparrow$, попадая за время Δt из нижнего слоя (более насыщенного песчинками) в верхний слой (менее насыщенный песчинками), приносят с собой в верхний слой несколько меньшее число песчинок, чем то, которое они имели в нижнем слое (поскольку часть песчинок, движущихся с относительной скоростью $w_0\downarrow$, выйдет за время Δt из этих объемов и останется в нижнем слое);

б) объемы же гидросмеси $\Delta V\downarrow$, попадая за то же время из верхнего слоя в нижний, будут приносить с собой несколько большее число песчинок, чем то, которое они содержали в верхнем слое (поскольку к этим объемам Δt добавится из верхнего слоя некоторое количество песчинок, движущихся вниз с относительной скоростью $w_0\downarrow$).

Только в случае $w_0 = 0$ равные по объему величины $\Delta V\uparrow$ и $\Delta V\downarrow$ будут переносить в соседние слои тот объем твердой фазы, который они содержали соответственно в нижнем и верхнем слоях, причем в этом случае концентрация песчинок после стабилизации степени насыщения должна оказаться одинаковой по глубине потока.

Как показывают опыты, интенсивность пульсации скоростей в случае безнапорных потоков уменьшается при удалении от дна потока. Следует считать, что на свободной поверхности спокойных потоков поперечная пульсационная скорость u'_z практически равна нулю. В связи с указанным снижением u'_z иногда получаем следующее: на некоторой высоте z_0 над дном, меньшей глубины потока h (рис. 20-3), пульсационная скорость u'_z оказывается равной гидравлической крупности w_0 , отвечающей наиболее мелким песчинкам, поднявшимся со дна русла; очевидно, дальнейший подъем песчинок будет невозможен (так как при $z > z_0$ получаем $u'_z < w_0$).² Линию $M-N$ (рис. 20-3), высотное положение которой определяется координатой z_0 , иногда называют потоком иа иосо в. В некоторых случаях граница $M-N$ бывает выражена весьма резко, выше этой границы имеем чистую воду обычного удельного веса, ниже ее — гидросмесь, характеризуемую относительно большим удельным

¹ Под концентрацией понимаем объем взвешенных песчинок, выраженный в долях объема гидросмеси (см. § 20-4).

² Такого рода рассуждения являются полностью справедливыми только в случае допущения, отмеченного в списке ³ на стр. 628.

весом. В этом случае получаем движение как бы двух разных жидкостей: имеет место резко выраженное «слоистое» строение потока, т. е., как говорят, стратификация потока.

Надо еще сказать, что в связи с уменьшением интенсивности пульсации скоростей u'_z при удалении от дна потока величина наибольшего размера d_{\max} песчинок, находящихся на определенном расстоянии z от дна, должна уменьшаться с увеличением z (см. эпюры 4–5–6–7 на рис. 20-3). Заметим также, что по мере роста концентрации твердой фазы (в процессе насыщения потока твердыми частицами) эпюра скоростей $A_1 B_1 C_1$ должна деформироваться — делаться более неравномерной.

Выяснив отмеченные выше обстоятельства, представим теперь, что после того, как степень насыщения потока песчинками стабилизировалась, в некоторый момент времени в силу тех или других причин величины поперечных



Рис. 20-4. Траектории (1 и 2), описываемые взвешенными твердыми частицами А и Б (при влечении их турбулентным потоком)

пульсационных скоростей в данном потоке снизились. Очевидно, в этом случае получим картину, обратную той, которая имела при насыщении потока песчинками: объем твердой фазы, выпадающей из потока на дно, будет превышать объем твердой фазы, поднимаемой потоком со дна. В результате (вне зависимости от величины средней скорости v движения воды) поверхность дна потока будет подниматься, причем мы получим заиливание русла. Оно будет продолжаться до тех пор, пока в потоке не останется то стабильное количество песчинок, которое отвечает новому (стабилизировавшемуся) уровню пульсаций скоростей; при этом распределение концентраций песчинок по глубине потока примет вид, например, фигуры 1–2'–3'–1 (рис. 20-3).

Рассматривая равномерное установившееся движение воды в призматическом русле в условиях стабилизировавшейся степени насыщения потока песчинками, отметим, что траектории, например, песчинок А и Б имеют вид кривых 1 и 2, показанных на рис. 20-4; сперва данная песчинка А поднимается кверху, а затем постепенно падает на дно, с тем чтобы снова подняться и т. д. Можно сказать, что при перемещении песчинок турбулентным потоком часть этих песчинок постоянно выпадает из толщи потока, другая же их часть постоянно поднимается потоком со дна.

Как видно, мы получаем «грунтообмен» между потоком и дном русла. При этом в случае стабилизировавшейся степени насыщения потока песчинками (и при отсутствии движения донных наносов) такой грунтообмен не вызывает деформации поверхности русла (русло не размывается и не заиливается).

Разумеется, чем крупнее песчинки, тем меньше будет для них размер z , показанный на рис. 20-4. Для достаточно крупных частиц размер z приближается к нулю. Именно такие частицы, а также весьма крупные частицы, которые вовсе не отрываются от дна, а катятся или скользят (сдвигаются) по нему иногда целыми слоями (под воздействием силы, поясненной в § 20-2), и называются донными наносами. В отличие от наносов, рассмотренных выше, называемых взвешенными.

Выше мы имели в виду русло, поддающееся размыву (песчаное русло). Если русло покрыто, например, бетонной одеждой (т.е. является не поддающимся размыву), то в случае, когда в такое русло поступает вода, уже содержащая в себе взвешенные наносы (а иногда и донные), приходится вначале анализировать только выпадение на дно русла принесенной взвеси, а затем и размыв ее (а также поведение донных наносов, если таковые имеются).

§ 20-4. ТЕРМИНОЛОГИЯ. НЕКОТОРЫЕ ПОЯТИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗУЧЕНИЕМ ВЗВЕСЕНЕСУЩИХ ПОТОКОВ

Будем рассматривать только взвешенные наносы (донных наносов касаться не будем).

Расходом гидросмеси $Q_{гс}$ называется ее объем, проходящий в единицу времени через данное живое сечение. Если концентрация взвешенных песчинок в воде мала, то практически расход гидросмеси можно считать равным расходу воды.

Расход твердой фазы или иначе «твердый расход» Q_t — объем твердой фазы (мысленно обращенный в монолит, лишенный пор), проносимой потоком в единицу времени через данное живое сечение.

«Твердый весовой расход» Q'_t — вес твердой фазы, проносимой в единицу времени через данное живое сечение; размерность этого расхода, например, кН/с (или кгс/с); очевидно $Q'_t = (Q_{гс} - Q) \gamma_t = Q'_t \gamma_t$, где Q — расход жидкой фазы (воды) и γ_t — вес материала, образующего твердую фазу, отнесенный к единице объема материала.

Мутность воды (или иначе весовая мутность воды) a — вес взвешенных песчинок в единице объема гидросмеси; размерность a , например, кН/м³ (или кгс/м³).

Концентрация твердой фазы (или иначе относительная объемная мутность) c — отношение объема твердой фазы (мысленно обращенной в монолит, лишенный пор) к объему гидросмеси, внутри которой находится данная твердая фаза; величина c — безразмерная; очевидно, что

$$c = \frac{Q_t - Q}{Q_{гс}} = \frac{Q'_t}{Q_{гс}}; \quad a = c \gamma_t = \frac{Q_t - Q}{Q_{гс}} \gamma_t = \frac{Q'_t}{Q_{гс}} \gamma_t \quad (20-8)$$

Положим, что нам задано цилиндрическое русло (определенного поперечного сечения, с определенным уклоном и шероховатостью), а также расход воды Q . Положим, что в данном русле имеет место безнапорное, равномерное, удачно вышедшее движение. Транспортирующей способностью такого безнапорного¹ потока называется твердый весовой расход, который получится, если мы представим себе, что этот поток насытился песчинками до предела (за счет размыва русла или за счет поступающей в него твердой фазы со стороны), причем степень насыщения потока наносами стабилизировалась. Размерность транспортирующей способности потока — например, кН/с (или кгс/с). В случае однозернистых песчинок величина транспортирующей способности зависит как от параметров потока, так и от крупности песчинок, поэтому величину ее следует связывать с крупностью перемещаемых однозернистых песчинок. В случае разнотернистых песчинок данная величина оказывается не вполне определенной: при наличии песчаного русла, поддающегося размыву, поток, вообще говоря, может «отби-

¹ Понятие транспортирующей способности используется, главным образом, при рассмотрении безнапорных потоков.

рат» из числа имеющихся фракций песка (образующего русло) различные сочетания этих фракций и обогащаться ими, при этом мы можем получать и различные величины его транспортирующей способности. Впрочем, здесь существует точка зрения, согласно которой поток должен отбирать вполне определенный гранулометрический состав наносов, в связи с чем он будет (при этом условии) иметь определенную (единственно возможную) транспортирующую способность, отвечающую заданному гранулометрическому составу разнотельного песка, образующего русло потока.

Условимся потоки, несущие количество песчинок, отвечающее его транспортирующей способности, называть потоками, полностью насыщенными наносами (в отличие от потоков недонасыщенных или перенасыщенных).

Местной предельной (предельно возможной) мутностью воды a_0 называется мутность воды, имеющая место в той или другой точке «полностью насыщенного потока».

Местной предельной (предельно возможной) концентрацией твердой фазы c_0 называется концентрация твердой фазы в той или другой точке «полностью насыщенного потока».

Выполняя различные расчеты, мы обычно оперируем средней скоростью v ; в связи с этим переменную по глубине предельную концентрацию c_0 приходится заменять средней предельной концентрацией (средней по глубине) \bar{c}_0 . Величина \bar{c}_0 должна определяться из условия, чтобы удельный твердый весовой расход q_T , получающийся (для плоской задачи) при использовании величин v и \bar{c}_0 :

$$q_T = \frac{Q_T}{b} = \bar{c}_0 \gamma_T v h = \bar{a}_0 v h. \quad (20-9)$$

равнялся бы действительному удельному твердому расходу

$$q_T = \frac{Q_T}{b} = \int_0^{z_0} c_0 \gamma_T u dz. \quad (20-10)$$

где b — ширина рассматриваемого прямоугольного русла, u — местная продольная скорость (см. на рис. 20-3 эпюру скоростей u гидросмеси); \bar{a}_0 — средняя по глубине мутность.

Как видно, величина средней предельной концентрации твердой фазы равна (для плоской задачи):

$$\bar{c}_0 = \frac{\int_0^{z_0} c_0 u dz}{v h}; \quad (20-11)$$

величину \bar{c}_0 на рис. 20-3 можно представить эпюрой $I-8-9-10$, имеющей вид прямоугольника.

Если твердый весовой расход взвесенесущего потока в каком-либо русле оказывается меньше расхода Q_T , вычисленного в соответствии с формулой (20-9), то следует считать, что данный поток является недонасыщенным наносами. Если имеем обратное соотношение в величинах отмеченных расходов, то должны считать, что данный поток является перенасыщенным, в связи с чем русло будет заиливаться.

При решении подобного рода задач необходимо знать для заданного потока величину \bar{a}_0 (или \bar{c}_0). В литературе приводится много разных эмпирических формул для этой величины. Большинство этих формул относится

к равномерному, установившемуся безнапорному потоку для условий, когда величина a_0 (или c_0) является не слишком большой: эти эмпирические формулы, разумеется, имеют определенные границы применимости. Эмпирические формулы, предлагаемые для песчаных русел разными авторами, можно привести к виду:

$$a_0 \left(\text{в } \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3} \right) = k_{вз} \frac{v^3}{w_0 R^{n_0}} \quad \text{или} \quad a_0 \left(\text{в } \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right) = 10k_{вз} \frac{v^3}{w_0 R^{n_0}}, \quad (20-12)$$

где v — средняя скорость, м/с; R — гидравлический радиус, м; w_0 — средняя гидравлическая крупность взвешенных частиц грунта, м/с; практически w_0 назначают как средневзвешенную гидравлическую крупность тех песчинок, которые слагают русло; $k_{вз}$ — коэффициент (имеющий размерность), лежащий в пределах:

$$k_{вз} = 0,017 - 0,034; \quad (20-13)$$

n_0 — показатель степени, изменяющийся в пределах

$$n_0 = \frac{3}{4} - \frac{4}{3}. \quad (20-14)$$

Пользуясь формулой (20-12), представляется возможным решать, в частности, соответствующие вопросы безнапорного гидротранспорта грунта, т. е. транспорта грунта по безнапорным каналам (лоткам, желобам и т. п.).

В литературе имеется ряд попыток построить кривую $c_0 = f(z)$ (см. кривую 2—3 на рис. 20-3) теоретическим путем, с тем, чтобы далее, исходя из этой кривой, определить, в соответствии с формулой (20-11), величину c_0 . Такие исследования относятся главным образом к однозернистым наносам (однозернистым пескам). В области этих исследований можно отметить две разные теории: а) диффузионную теорию взвесенесущих потоков, разработанную применительно к волным потокам В. М. Маккавеевым, и б) гравитационную теорию, предложенную М. А. Великановым.

В основу диффузионной теории заложено допущение о возможности использования особого «диффузионного закона» (аналогичного законам Фика). При таком допущении распределение предельной концентрации c_0 твердой фазы по вертикали описывается в соответствии с законом теории диффузии (для равномерного установившегося движения гидросмеси) следующим дифференциальным уравнением:

$$-w_0 \frac{\partial c_0}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} D_0 \frac{\partial c_0}{\partial z}, \quad (20-15)$$

где D_0 — так называемый коэффициент турбулентной диффузии, зависящий от динамического коэффициента турбулентной вязкости η_t (см. стр. 150):

$$D_0 = \frac{\theta}{\gamma} \eta_t; \quad (20-16)$$

w_0 — гидравлическая крупность рассматриваемых однозернистых наносов.

Если предположить, согласно В. М. Маккавееву, что величина η_t постоянна (не зависит от координаты z)¹, то в соответствии с исследованиями А. Д. Грешаева можно показать, что

¹ Такое положение может иметь место при определенном («параболическом») распределении скоростей u по вертикали.

$$a_0 : \frac{v^3}{w_0} \quad (20-17)$$

это соотношение, как видно, подтверждает справедливость структуры эмпирической формулы (20-12).

Надо заметить, что теоретические исследования М. А. Великанова в области данного вопроса также приводят к зависимости типа (20-12): М. А. Великанов на основании обрвотки некоторых экспериментальных данных В. С. Кнороза получил (для одностерных наносов) зависимость

$$\bar{a}_0 \left(\text{в } \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3} \right) = 0,017 \frac{v^3}{w_0 R} \quad \text{или} \quad \bar{a}_0 \left(\text{в } \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right) = 0,17 \frac{v^3}{w_0 R} \quad (20-18)$$

Разумеется, как эта зависимость, так и обобщенная зависимость (20-12), приемлемы только в случае, когда $w_0 < (u'_z)_{\text{минс}}$. Приведем еще полуэмпирическую зависимость М. Я. Крупника, относящуюся к песчаным грунтам, которая в отличие от формул (20-12) и (20-18) учитывает соотношение величин w_0 и u'_z :

$$\left. \begin{aligned} a_0 \left(\text{в } \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3} \right) &= \frac{0,076v^3}{w_0 R} \left(0,274 - \frac{w_0^2}{(u'_z)^2} \right) \\ \bar{a}_0 \left(\text{в } \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \right) &= \frac{0,76v^3}{w_0 R} \left(0,274 - \frac{w_0^2}{(u'_z)^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (20-19)$$

где осредненная величина $(u'_z)^2$ может быть определена по формуле С. Ф. Савельева:

$$(\overline{u'_z})^2 = \left(\frac{0,078v}{h^{0,21}} \right)^2; \quad (20-20)$$

в выражениях (20-19) и (20-20) величины R и h — в м, а v , w_0 и u'_z — в м/с.

§ 20-5. НАПОРНЫЙ ГИДРОТРАНСПОРТ

Транспорт гидросмеси, а следовательно, и грунта по напорному трубопроводу (пульповоду) осуществляется при помощи насосов.

При движении гидросмеси по пульповоду в общем случае получаем условия, когда одна часть твердой фазы (т.е. грунта) движется во взвешенном состоянии, а другая часть, образованная более крупными фракциями, — непосредственно по дну трубопровода (аналогично донным наносам; см. выше). Если в какой-либо момент эксплуатации пульповода средняя скорость v движения гидросмеси в нем окажется меньше некоторой скорости $v_{\text{мин}}$, т.е.

$$v < v_{\text{мин}} \quad (20-21)$$

то рассматриваемый пульповод начнет интенсивно заилиться за счет выпадения на дно взвешенных частиц грунта.

Скорость $v_{\text{мин}}$ может быть названа минимальной незаилющей скоростью. Заметим, что часто эту скорость называют «критической»; однако применение здесь такого термина надо признать неудачным.

Для определения скорости $v_{\text{мин}}$ было предложено различными авторами (Г. Н. Роером, А. М. Царевским, П. Д. Евдокимовым, В. С. Кнорозом, А. П. Юфиним и др.) много разных эмпирических формул. Только для примера приведем здесь следующую формулу [20-8] для подсчета $v_{\text{мин}}$ в м/с:

$$v_{\text{мин}} = 8 \sqrt[3]{D \sqrt{c_0 \Psi}} \quad (20-22)$$

где D — диаметр пульповода в м; c_0 — средняя предельная концентрация твердой фазы; Ψ — эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от величины фракции грунта по особой таблице (например, для фракций грунта, $d = 0,05 - 0,10$ мм значение $\Psi = 0,02$; для $d = 0,50 - 1,00$ мм значение $\Psi = 0,80$; для $d = 10 - 20$ мм значение $\Psi = 2,0$).

Если будем проектировать пульповод на скорость $v < v_{\text{мин}}$, то, как отмечено выше, он будет в значительной мере заняться в процессе эксплуатации; если же (при заданном пьезометрическом уклоне) данный трубопровод проектируем на скорость $v > v_{\text{мин}}$, то получим неэкономичное решение: концентрация твердой фазы будет не велика; поэтому для транспортирования данного объема грунта придется затрачивать большое количество воды. В связи со сказанным напорные пульповоды проектируют так, чтобы скорость v в них была бы равна (при рассмотрении «расчетного случая») минимальной незапняющей скорости $v_{\text{мин}}$, т. е.

$$v = v_{\text{мин}} \quad (20-23)$$

Исходя из этого условия и используя формулу (20-22), получаем следующие расчетные зависимости.

Скорость в проектируемом пульповоде

$$v = \frac{Q_{\text{гс}}}{\omega} = \frac{Q'_{\text{г}}}{c_0 \omega} \quad (20-24)$$

где ω — живое сечение; в связи с этим и учитывая (20-23), формулу (20-22) можно переписать в виде

$$\frac{Q'_{\text{г}}}{c_0 \omega} = 8 \sqrt[3]{D \sqrt{c_0 \Psi}} \quad (20-25)$$

где левая часть (так же как и правая) должна выражаться в м/с; решая (20-25), получаем:

$$c_0 = \sqrt[7]{\left(\frac{Q'_{\text{г}}}{8\omega \sqrt[3]{D \sqrt{\Psi}}} \right)^6} \quad (20-26)$$

По этой формуле, зная $Q'_{\text{г}}$, D и Ψ , можно найти величину c_0 , пользуясь которой, определяем

$$v_{\text{мин}} = \frac{Q'_{\text{г}}}{c_0 \omega}; \quad Q_{\text{гс}} = v_{\text{мин}} \omega; \quad Q = Q_{\text{гс}} - Q'_{\text{г}} \quad (20-27)$$

где Q — расход воды.

Часто задача ставится и решается следующим образом.

Задана величина $Q'_{\text{г}}$ (т. е. объемный расход твердой фазы), а также задан гранулометрический состав грунта, пользуясь которым, устанавливается величина Ψ . Зная $Q'_{\text{г}}$ и Ψ , задаются рядом диаметров пульповода: D_1, D_2, D_3, \dots и для каждого заданного диаметра D по зависимостям (20-26) и (20-27) определяют величины $v = v_{\text{мин}}$ и Q .

Дополнительно для каждого намеченного варианта трубопровода определяют потерю напора h_f по длине трубопровода. От величины h_f зависит мощность насосов и стоимость электроэнергий.

На основании экономического сопоставления намеченных вариантов и устанавливают искомую величину D , а также мощность насосной станции.

Надо заметить, что для определения потерь напора h_f при движении гидросмеси в круглых трубах было предложено много различных эмпирических

формул. Из рассмотрения этих формул видно, что в общем случае потеря напора для гидросмеси получается большей, чем для чистой воды. Однако при не слишком большой концентрации твердой фазы и при наличии мелких фракций грунта потери напора в случае гидросмеси практически получаются такими же, как и в случае чистой воды. Разумеется, рассчитывая потери напора h_f по формулам, относящимся к чистой воде, мы должны принимать во внимание, что потеря h_f должна здесь выражаться высотой столба жидкости, имеющей объемный вес, равный объемному весу транспортируемой гидросмеси.

В заключение необходимо обратить внимание на следующее.

Как отмечалось, в случае $v < v_{\text{мин}}$ происходит выпадение взвешенных частиц грунта на дно трубопровода. При этом живое сечение трубопровода должно уменьшаться, а скорости v соответственно увеличиваться (при неизменном расходе гидросмеси, подаваемом насосами). В связи с этим после некоторого заиливания трубопровода дальнейший рост этого заиливания должен прекратиться. Как видно, в случае напорного движения получаем как бы саморегулирование движения гидросмеси.

Дополнительно о расчете напорного гидротранспорта см. [20-3; 20-8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 20-1. Великанов М. А. Руслевой процесс. — М.: Физматгиз, 1958.
- 20-2. Ибад-Заде Ю. А. и Нуриев Ч. Г. Расчет отстойников. — М.: Стройиздат, 1972.
- 20-3. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов/И-59-72. — Л.: Энергия, 1972.
- 20-4. Леви И. И. Инженерная гидрология. — М.: Высшая школа, 1968.
- 20-5. Мавкаев В. М., Коновалов И. М. Гидравлика. — Л.— М.: Речиздат, 1940.
- 20-6. Рауз Х. Механика жидкости для инженеров-гидротехников. — М.— Л.: Госэнергоиздат, 1958.
- 20-7. Рейнер М. Деформация и течение. — М.: Гостоптехиздат, 1963.
- 20-8. Технические указания по расчету напорного гидравлического транспорта грунтов/ВСН-02-66 МЭиЭ СССР. — Л.: Энергия, 1967.
- 20-9. Уилкинсон У. Л. Неньютоновские жидкости. — М.: Мир, 1964.
- 20-10. Хачатрян Л. Г. Отстойники на оросительных системах. — М.: Сельхозгиз, 1957.