

17.6. Контрольные вопросы

1. Какие возможны зоны в потоке с точки зрения существования различных кривых свободной поверхности при уклоне, большем нуля?
2. Какие имеются виды кривых свободной поверхности?
3. Какая особенность дифференциального уравнения плавно изменяющегося неравномерного движения жидкости в открытых руслах свидетельствует о том, что свободная поверхность может изменяться не только плавно в пространстве, но и скачкообразно?
4. Подробно проанализируйте кривые свободной поверхности в русле с прямым уклоном дна, меньшим критического.
5. Проанализируйте кривые свободной поверхности в русле с прямым уклоном дна, большим критического.
6. Проанализируйте кривые свободной поверхности в русле с прямым уклоном дна, равным критическому.
7. Проанализируйте формы кривых свободной поверхности в открытых призматических руслах с нулевым и обратным уклоном. Дайте энергетическую трактовку.
8. Опишите основные этапы интегрирования дифференциального уравнения установившегося неравномерного движения в открытых призматических руслах, предшествующие приведению уравнений к виду, удобному для интегрирования.
9. Выполните преобразования и напишите расчетные формулы для длины кривых свободной поверхности при прямом, обратном и нулевом уклоне.
10. Какие типы способов расчета кривых свободной поверхности при рассматриваемом движении вы можете указать? В чем принципиальное различие типов этого расчета?
11. В чем заключается способ расчета кривых свободной поверхности в открытых призматических руслах, предложенный И. И. Агроскиным?
12. Как в указанном способе расчета отражены особенности трапециевидного, параболического и сегментного поперечного сечений?
13. Как рассчитываются кривые свободной поверхности в руслах (призматических), если значение x задано и равно целому числу (например, 2, 3, 4)? Напишите расчетные формулы.
14. Как выполняется расчет кривых свободной поверхности по способу Бахметева?
15. Что такое гидравлический показатель русла? Как он определяется?
16. Зависит ли выражение для гидравлического показателя русла от того, будет ли уклон нулевым, прямым или обратным?
17. Опишите последовательность и способы выполнения расчета кривых свободной поверхности в открытых призматических руслах.
18. Каковы особенности установившегося неравномерного плавно изменяющегося движения жидкости в открытых непризматических руслах? Как рассчитываются кривые свободной поверхности в этих руслах?

Глава 18

КРИВЫЕ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ В ЕСТЕСТВЕННЫХ РУСЛАХ

18.1. Общая характеристика движения в реках

Условия движения воды в естественных руслах рек существенно отличаются от условий движения воды в искусственно созданных водотоках — каналах.

В естественных водотоках расход во времени изменяется. Но в период между паводками это изменение происходит достаточно медленно (квазиустановившееся движение), т. е. движение условно считается установившимся.

Для рек характерна смена по длине потока широких и узких, глубоких и мелких участков русла. При достаточно хорошей выраженности глубокие участки называют плесами, а мелкие — перекатами. В руслах часто имеются острова, излуины, осередки, побочни и другие крупные (макро) надводные и подводные формы. Все это приводит к непостоянству площади живого сечения и, следовательно, средней скорости потока по длине реки. Изменяется и уклон свободной поверхности. В период межени на плесовых участках средняя скорость и уклон свободной поверхности меньше, чем на перекатах. Таким образом, для рек характерно наличие сменяющихся друг друга по длине реки участков с неравномерным движением (замедленным или ускоренным). Если рассматриваются достаточно длинные участки, в среднем в период между половодьями и паводками можно не учитывать неравномерность движения на отдельных участках.

При возведении гидротехнических сооружений, создающих подпор (плотины), бытовой режим естественных водотоков нарушается. Движение выше по течению от сооружения становится замедленным, глубины растут, средние скорости потока уменьшаются.

В результате дноуглубления, проведенного в значительных масштабах, или устройства в русле реки карьеров, из которых добываются нерудные материалы, условия движения на таких участках могут характеризоваться увеличенными уклонами свободной поверхности по сравнению с предшествующими бытовыми условиями. Движение в этих случаях — также неравномерное.

18.2. Общие способы расчета кривых свободной поверхности

Если в уравнении (15.4) потери напора при неравномерном движении выразить так же, как и при равномерном движении, т. е. с учетом

$$\frac{v^2}{C^2 R} = J;$$

$$\frac{\alpha v}{g} \frac{dv}{dl} = \frac{d}{dl} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right),$$

то получим

$$-\frac{dz}{dl} = \frac{d}{dl} \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + J, \quad (18.1)$$

где (по рис. 15.1) $dz/dl = dh/dl - i$, i — уклон дна русла; z — ордината свободной поверхности в данном живом сечении.

Тогда изменение z по длине запишется в виде

$$-dz = d \left(\frac{\alpha v^2}{2g} \right) + J dl. \quad (18.2)$$

Для решения этого уравнения и расчета кривых свободной поверхности в естественных руслах применяются приближенные способы. Намечается несколько расчетных участков по длине русла. Участки назначаются так, чтобы гидравлические характеристики: форма и площадь живого сечения; шероховатость, оцениваемая коэффициентом n ; уклон свободной поверхности в бытовых (незарегулированных) условиях — в пределах каждого участка были примерно одинаковыми. В пределах участка расход должен быть постоянным. Если имеются притоки, в створе их устьев выбираются

граничные сечения участков. При известном расходе Q в заданном уровне (ординате свободной поверхности) в конце нижнего по течению (первого) участка реки определяется отметка свободной поверхности в начале участка. Эта отметка будет исходной при расчете следующего (расположенного выше по течению) участка, для которого начальный створ первого участка будет конечным створом.

Расчеты проводятся с переходом от участка к участку вверх по течению. Если рассчитывается кривая подпора, связанного с возведением плотины, конечное сечение первого участка совпадает со створом у плотины.

Длина участка может быть различной — от десятков метров до нескольких километров в зависимости от конкретных условий. В пределах каждого расчетного участка свободная поверхность считается прямолинейной, т. е. кривая свободной поверхности для участка может быть построена по двум точкам. При этом разность отметок свободной поверхности в конечном и начальном сечениях расчетного участка не должна превышать $\Delta z = 0,5 \div + 0,75$ м, причем предпочтительнее, чтобы $\Delta z = 0,2 \div 0,3$ м.

Приближенные способы расчета можно разделить на две группы.

К первой группе относятся способы, в которых естественное русло заменяется фиктивным призматическим руслом с одинаковой по длине формой. На каждом отдельном участке уклон дна считается постоянным. Форма поперечного сечения фиктивного призматического русла принимается по возможности близкой к форме поперечного сечения реки на данном участке. Но обычно принимается фиктивное русло с широким прямоугольным или широким параболическим поперечным сечением. Уклон дна фиктивного русла на данном участке принимается равным уклону свободной поверхности в бытовых условиях. Расход, проходящий по данному участку фиктивного русла, принимается равным действительному расходу в бытовых условиях Q , т. е.

$$Q = \omega_{\phi} C_{\phi} \sqrt{R_{\phi} i_{\phi}}.$$

Для широкого прямоугольного поперечного сечения

$$\omega_{\phi} = B_{\phi} h_{0\phi}; \quad R_{\phi} \approx h_{0\phi}.$$

Ширина потока по верху в фиктивном русле в условиях подпора или спада назначается ориентировочно по поперечному профилю русла.

Задавшись каким-либо значением глубины фиктивного русла, можно вычислить C_{ϕ} по одной из известных уже формул, например $C_{\phi} = 1/n h_{0\phi}^{1,7}$. Тогда

$$Q = B_{\phi} \frac{\sqrt{i_{\phi}}}{n} h_{0\phi}^{1,7}.$$

Отсюда определяется $h_{0\phi}$, затем уточняются значения C_{ϕ} , B_{ϕ} и расчет повторяется вновь. Аналогично выполняется расчет для широкого параболического русла. После принятия окончательного значения $h_{0\phi}$ проводится расчет кривой свободной поверхности, как для обычного призматического русла (см. гл. 17).

Ко второй группе относятся приближенные способы построения кривых свободной поверхности, основанные на результатах непосредственно интегрирования уравнения (18.2).

Если перейти к конечным разностям, уравнение (18.2) можно записать в виде

$$\Delta z = \alpha \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{v_{\text{ср}}^2}{C_{\text{ср}}^2 R_{\text{ср}}} l, \quad (18.3)$$

или

$$\Delta z = \alpha \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{Q^2}{K_{\text{ср}}^2} l, \quad (18.4)$$

где l — длина выбранного надлежачим образом расчетного участка; $v_{\text{ср}}$, $R_{\text{ср}}$, $K_{\text{ср}}$ — средние значения параметров на участке l .

По уравнениям (18.3) или (18.4) путем последовательных приближений или графически находится Δz для данного расчетного участка. Для этого, как указывалось, при известных значениях Q и ординаты свободной поверхности в исходном сечении первого участка задается значением Δz . Затем вычисляются все параметры, входящие в (18.3) или (18.4). Обычно применяется уравнение (18.4). Далее при их подстановке в (18.4) и получении неравенства расчет продолжается до тех пор, пока обе части (18.4) не будут практически равными. Завершив расчет одного участка, можно переходить к следующему и т. д., т. е. до створа, где глубина станет равной заранее назначенной. Удобно для каждого сечения предварительно построить кривые зависимости ω , χ , R , C , v от ординаты свободной поверхности z во всем предлагаемом диапазоне изменения z . В большинстве случаев изменениями скоростного напора по длине расчетного участка пренебрегают. Тогда уравнение (18.4) получает такой вид:

$$\Delta z = Q^2 l / K_{\text{ср}}^2 \quad (18.5)$$

или

$$J = Q^2 / K_{\text{ср}}^2. \quad (18.6)$$

Следует отметить, что при неравномерном движении $K_{\text{ср}}$ не равняется K_0 (в условиях равномерного движения). При $Q = \text{const}$, как это и бывает на расчетном участке при построении кривых свободной поверхности в естественных руслах, при подпоре $K_{\text{ср}} > K_0$ и, следовательно, уклон J меньше, чем при равномерном движении. При перемещении вверх (по течению) по кривой подпора уклон свободной поверхности все более приближается к значению, равному i (уклон дна). При спаде, наоборот, $K_{\text{ср}} < K_0$. И опять по мере приближения глубин в пределах кривой спада к h_0 уклон свободной поверхности все более приближается к i .

Из уравнения (18.6), так же как и из (18.4), можно найти Δz в результате последовательных приближений или графически.

Для выполнения расчетов по методу непосредственного интегрирования необходимо иметь топографические и гидрометрические данные, которые позволили бы разбить русло на участки, построить продольные и поперечные профили русла. Зная поперечные профили русла в начальном и конечном сечениях данного расчетного участка, можно определить $\omega_{\text{ср}}$, $R_{\text{ср}}$, $C_{\text{ср}}$, $K_{\text{ср}}$.

Коэффициенты шероховатости естественных русл существенно отражаются на получаемых результатах. Точное определение коэффициентов местных сопротивлений затруднительно. Сопротивления движению воды в естественном русле складываются из сопротивлений, которые можно отнести к местным (обусловленным наличием крупных гряд на дне, побочной и островов, поворотами русла), и сопротивлений по длине (обусловленным шероховатостью слагающих дно и берега грунтов).

При расчетах используются коэффициенты шероховатости, полученные в рассматриваемом русле в бытовых, еще не зарегулированных условиях. По гидрометрическим данным из формулы Шези определяется коэффициент $C = v_{\text{ср}} / \sqrt{RJ}$ для приблизительно однотипных участков реки. Определив C по принятой для расчетов формуле (например, Агроскина или Павловского), находят значение коэффициента шероховатости n .

Найденные значения коэффициента шероховатости будут отражать все особенности условий, в которых происходит движение в данном русле, в том

числе и так называемые местные сопротивления. В коэффициенте Шези C , по сути дела, также будут учтены как потери напора по длине, так и местные потери напора для каждого из данных участков, где определялся коэффициент шероховатости. Следует учитывать, что полученные по натурным данным значения коэффициентов шероховатости могут зависеть от глубины наполнения русла, хотя по исходным представлениям коэффициент n должен был бы отражать только характер шероховатости поверхности русла.

До выхода потока на пойму коэффициент шероховатости естественного русла во многих случаях постепенно уменьшается. Но когда в пропуск расходов включается и пойма, обычно гораздо более шероховатая, чем русло, коэффициент n резко возрастает.

На ряде рек в связи с особенностями напластования прорезаемых рекой различных пород и с другими особенностями (например, зарастанием берегов) коэффициент n с ростом глубины не уменьшается а иногда может увеличиваться.

Значения коэффициентов шероховатости естественных водотоков могут быть приняты по составленной И. Ф. Карасевым табл. П.18.1.

18.3. Специальные способы расчета кривых свободной поверхности

В расчетной практике широко применяются специальные способы расчета, предложенные для построения кривых свободной поверхности в естественных руслах при наличии гидрометрических данных в достаточном объеме. Эти способы основаны на применении модуля сопротивления

$$F = l/K^2, \quad (18.7)$$

где l — длина расчетного участка; K — расходная характеристика на этом участке.

При этом используется важное для расчетов положение о независимости модуля сопротивления от уклона свободной поверхности — так называемый постулат инвариантности модуля сопротивления. Как показывают данные натурных исследований, постулат инвариантности модуля сопротивления справедлив в основном для равнинных рек. Согласно этому постулату модуль сопротивления l/K^2 на данном участке является функцией только средней отметки уровня воды z_{cp} и не зависит от гидравлического уклона, т. е. положения кривых свободной поверхности ($a-a$ и $a'-a'$ на рис. 18.1) (разностью скоростных напоров

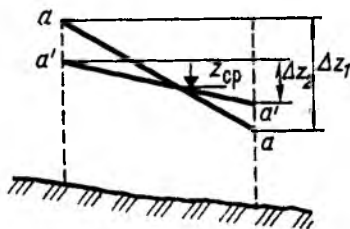


Рис. 18.1

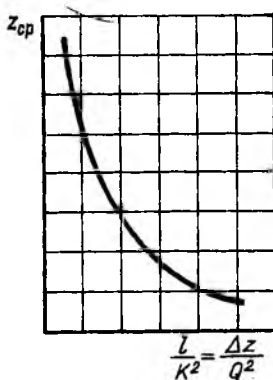


Рис. 18.2

в различных сечениях пренебрегли). Тогда на данном расчетном участке среднее значение расходной характеристики $K_{\text{ср}}$ зависит только от $z_{\text{ср}}$. При одном и том же значении $z_{\text{ср}}$ на данном расчетном участке $K_{\text{ср}}^2$ и $F = 1/K^2$ будут одинаковыми при различных уклонах свободной поверхности (рис. 18.1).

Таким образом,

$$F = \Delta z/Q^2 = f(z_{\text{ср}}). \quad (18.8)$$

При использовании любого специального способа расчета река разбивается по длине на ряд расчетных участков. В пределах каждого участка определяется осредненный поперечный профиль, измеряется длина участка при разных уровнях. Для осредненного поперечного профиля каждого расчетного участка вычисляются при разных уровнях ω , B , $R = h_{\text{ср}}$, C , K . При определении коэффициента Шези коэффициент шероховатости n вычисляется по гидрометрическим данным или при их отсутствии — по таблицам. Для каждого значения средней отметки уровня $z_{\text{ср}}$ определяется значение модуля сопротивления по (18.7) и строятся графики $F = 1/K^2 = f(z_{\text{ср}})$ для каждого расчетного участка (рис. 18.2).

Рассмотрим один из специальных способов — расчет по способу А. Н. Рахманова. Расход Q и отметка уровня воды в конце нижнего по течению расчетного участка $z_{\text{к}}$ известны. Задаемся отметкой уровня воды в начальном сечении $z_{\text{н}}$. Тогда $z_{\text{ср}} = (z_{\text{н}} + z_{\text{к}})/2$. По найденному значению $z_{\text{ср}}$ получим по графику на рис. 18.2 для данного участка значение $\Delta z/Q^2$. Умножив найденное значение $\Delta z/Q^2$ на Q^2 , получим Δz . Если полученное Δz равно $\Delta z = z_{\text{н}} + z_{\text{к}}$, расчет закончен. Если получилось неравенство, вновь задаемся значением $z_{\text{н}}$ и повторяем расчет вплоть до практически равных значений Δz .

Как видим, описанный способ расчета связан с последовательными приближениями.

Найдя отметку уровня в начале первого расчетного участка $z_{\text{н1}}$, определим отметку в конце второго расчетного участка, так как $z_{\text{н1}} = z_{\text{н2}}$, и т. д. Напомним, что расчет ведется с переходом от участка к участку против течения.

Отметим, что использование данных гидрометрических наблюдений при построении графиков $F = \Delta z/Q^2 = f(z_{\text{ср}})$ обеспечивает учет различных особенностей данного русла в окончательных расчетах.

Кроме рассмотренных способов известны еще и другие по расчету свободной поверхности в естественных руслах.

18.4. Контрольные вопросы

1. Каковы основные черты приближенных способов расчета кривых свободной поверхности в естественных руслах? В чем особенности различных способов расчета?
2. Что такое постулат инвариантности модуля сопротивления?
3. Поясните, как проводится расчет кривых свободной поверхности в естественных руслах по способу Рахманова.