

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

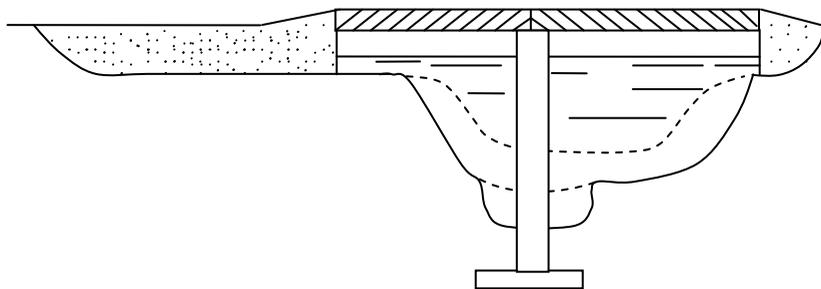
*Знания, не проверенные  
опытом, бесплодны  
Леонардо да Винчи*



## **ПРАКТИКУМ ПО МОСТОВОЙ ГИДРАВЛИКЕ НА ПОРТАТИВНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-3»**

**Методические указания к лабораторно-практическим работам  
по гидравлике и гидрологии по направлению  
подготовки бакалавров – 270800 «Строительство»**

Составители Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин,  
А.И. Соболев, Н.А. Калинин



Томск – 2014

Практикум по мостовой гидравлике на портативной лаборатории «Капелька-3»: Методические указания к лабораторно-практическим работам / Сост. Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин, А.И. Соболев, Н.А. Калинин. – Томск: Изд-во Томского архит.-строит. ун-та. – 2014. – 31с.

В указаниях приводятся основные теоретические сведения, содержание и порядок выполнения демонстраций и лабораторно-практических работ по мостовой гидравлике на разработанной авторами портативной лаборатории «КАПЕЛЬКА – 3». По сравнению с аналогами она не имеет двигателей, насосов, вентилях, не требует подвода воды и электроэнергии, удобна для демонстраций, экономит лабораторные площади и имеет низкую стоимость.

Методические указания предназначены для изучения дисциплин «Гидравлика» и «Гидрология» по направлению подготовки бакалавров – 270800 «Строительство» по профилям подготовки «Автомобильные дороги» и «Автодорожные мосты и тоннели».

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
Описание учебной лаборатории «Капелька-3».....	4
Работа 1. Изучение малых мостов.....	6
Работа 2. Изучение мостовых переходов.....	12
Работа 3. Изучение русловых процессов.....	21
Список рекомендуемой литературы.....	31

## ВВЕДЕНИЕ

На дорогах России ежегодно сооружается все большее количество мостов и мостовых переходов. Для грамотного проектирования, строительства и эксплуатации таких сооружений инженеры-дорожники и инженеры-мостовики должны иметь ясное представление о русловых процессах, картине течений и размывах в подмостовых руслах. При изучении этих вопросов наиболее продуктивными являются лабораторно-практические занятия, в ходе которых студенты изучают общие сведения о таких явлениях, а затем наблюдают их и выполняют замеры на разработанных авторами учебных устройствах портативной лаборатории «Капелька-3».

В практикуме приводятся основные теоретические сведения, содержание и порядок выполнения наглядных демонстраций и лабораторно-практических работ по вопросам мостовой гидравлики. Он предназначен для студентов строительных и транспортных специальностей при изучении дисциплин «Гидравлика» и «Гидрология», а также при освоении разделов других дисциплин, в которых рассматриваются вопросы проектирования водопропускных сооружений.

Практикум может быть использован при самостоятельном изучении соответствующих разделов указанных дисциплин.

## ОПИСАНИЕ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «КАПЕЛЬКА-3»

Лаборатория "Капелька-3" разработана в ТГАСУ на основе патента РФ на изобретение №1721326. Она позволяет выполнять наглядные лекционные демонстрации и 3 учебные лабораторно-практические работы по мостовой гидравлике.

Лаборатория состоит из трех прозрачных пластмассовых устройств №/№ 8, 9 и 10 для изучения соответственно малых мостов, мостовых переходов и русловых процессов. Устройства имеют малые размеры (360x240x50 мм), заполнены водой с микроскопическими частицами алюминия для визуализации течения и работают по принципу песочных часов, поэтому не требуют подвода воды и электроэнергии, умещаются в чемодане, удобны для наглядных демонстраций и имеют низкую стоимость.

Устройства содержат по два бака 1 и 2 (рис. В, а), соединённых между собой двумя опытными каналами 3 и 4 через отверстия 5, 6 и 7, 8. Опытные каналы в устройстве №8 (рис. В, а) представляют собой модели русел неподтопленного 3 и подтопленного 4 малого моста. В устройстве №9 (рис. В, б и в) они иллюстрируют мостовой переход в плане (б) и в продольном сечении (в), а в устройстве №10 (рис. В, з) – русла с различными типами русловых процессов.

Устройства работают следующим образом. При перевёртывании устройства (например, №8) жидкость из верхнего бака 1 самотеком поступает через отверстие 7 в опытный канал 4 и через отверстие 6 отводится в нижний бак 2, а воздух из него вытесняется через отверстие 8, опытный канал 3 и отверстие 5 в верхний бак 1 в виде пузырьков. Благодаря пузырьковому перепуску воздуха обеспечиваются постоянные во времени напор питания  $H_n$  опытного канала 4, глубины  $h$  и расход  $Q$  наблюдаемого в нем потока.

Глубины потока измеряют по шкалам на стенке опытного канала. Расход определяют объёмным способом по времени наполнения (опорожнения) контрольного объема бака со шкалой 9. Расход можно регулировать наклоном устройств от себя или в стороны.

При следующем перевертывании устройства изучают течение уже в другом его опытном канале – в канале 3.

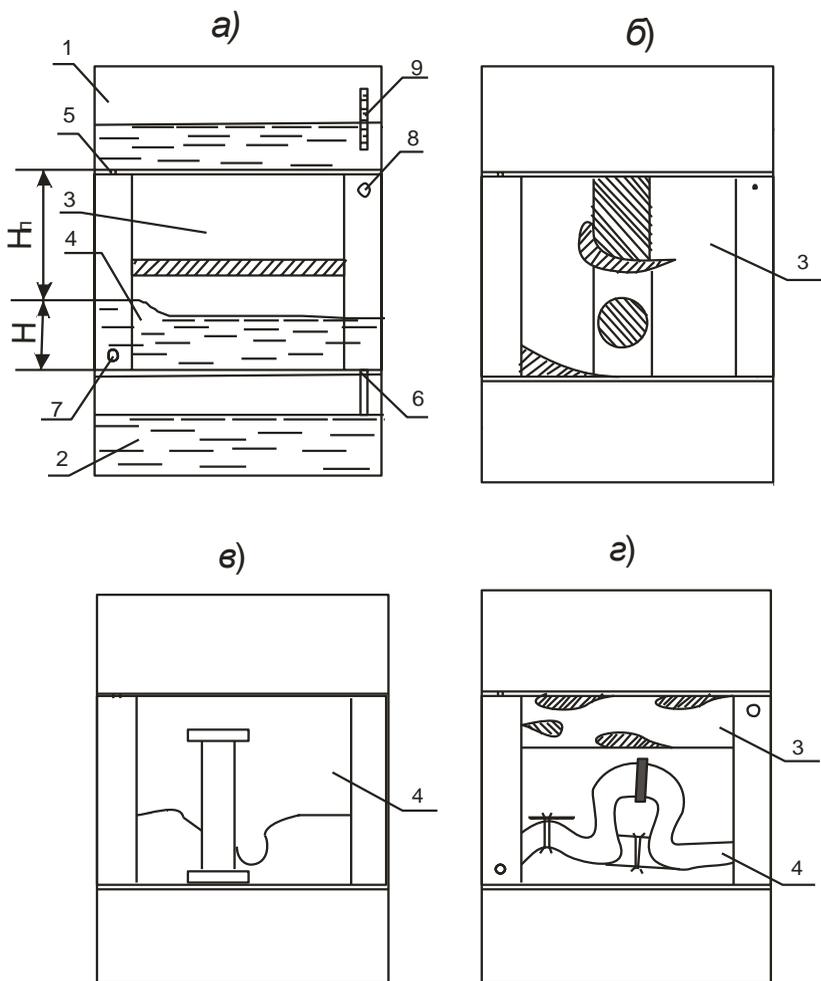


Рис. В. Схемы устройств №8 (а); №9 (б, в); №10 (г):  
 1, 2 – баки; 3 и 4 – щелевые опытные каналы; 5, 6 и 7, 8 – отверстия, соединяющие баки с опытными каналами; 9 – уровнемерная шкала

# РАБОТА 1. ИЗУЧЕНИЕ МАЛЫХ МОСТОВ

**Цель работы.** Изучение картины свободного и подтопленного течения воды под малым мостом, определение глубины воды перед мостом путем измерения и расчета.

## 1.1. Общие сведения

*Малыми мостами* называются мосты длиной по настилу до 25 м. Несмотря на сравнительно небольшие размеры этих мостов, общая стоимость их на километр дороги может быть значительной, так как в зависимости от характера рельефа местности и гидрологических условий количество малых мостов бывает очень большим.

Малые мосты обычно сооружаются из железобетона и камня. Наибольшее применение имеют сборные железобетонные мосты из обычного и предварительно напряженного железобетона. Отверстия малых мостов устанавливают в соответствии с расчетом и максимальным использованием унифицированных сборных пролетных строений длиной 6, 9, 12, 15 и 18 м. Подмостовые русла могут иметь прямоугольное или трапецеидальное сечение.

В основе гидравлического расчета малых мостов лежит теория водослива с широким порогом. Условия протекания воды через эти мосты аналогичны условиям протекания воды через водослив с широким порогом, несмотря на то, что порог под мостами отсутствует, а поток испытывает в основном боковое сжатие.

Мосты могут работать по схеме неподтопленного или подтопленного водослива (рис. 1.1).

При *неподтопленном (свободном) течении* поверхность воды (на рис. 1.1, *a* показана сплошной линией) имеет перепады на входе и выходе из отверстия моста, а под мостом чаще устанавливается критическая глубина  $h_k$ . В этом случае бытовая глубина  $h_b$  в нижнем бьефе (за мостом) не оказывает влияния на положение уровня воды в верхнем бьефе (перед мостом). Такой режим течения наблюдается при условии  $h_b \leq 1,3 h_k$ .

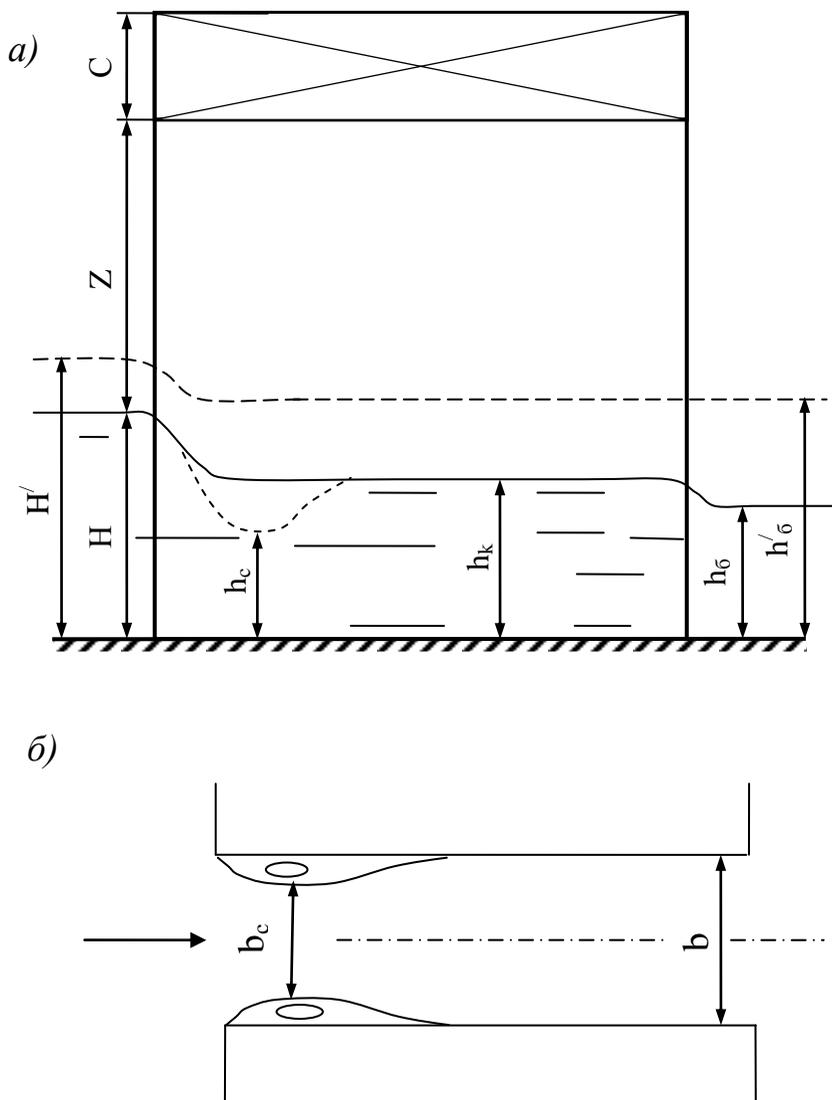


Рис. 1.1. Схема малого моста при прямоугольном сечении отверстия:  
 а – продольный профиль водной поверхности;  
 в – план водного потока

Мост работает с *подтоплением*, если  $h_6 > 1,3 h_k$ . В этом случае уровень воды под мостом (на рис. 1.1, *a* показан пунктиром) совпадает с уровнем воды в нижнем бьефе, то есть под мостом устанавливается бытовая глубина  $h_6$ .

**Расчет малого моста по критической глубине** при прямоугольном сечении подмостового русла проводится в следующем порядке:

1. Определяется бытовая глубина  $h_6$  водотока за мостом одним из известных способов.

2. В зависимости от рода грунта или типа выбранного укрепления подмостового русла по справочным данным назначается допускаемая (неразмывающая) скорость под мостом  $V_d$ .

3. Определяется критическая глубина потока под мостом

$$h_k = V_d^2 / g, \quad (1.1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

4. Устанавливается характер течения воды под мостом путем сравнения бытовой глубины с величиной  $1,3 h_k$ . Если  $h_6 \leq 1,3 h_k$ , то течение воды под мостом – свободное. При  $h_6 > 1,3 h_k$  течение воды под мостом будет несвободным (подтопленным).

***1 случай –  $h_6 \leq 1,3 h_k$  – свободное истечение***

В этом случае глубина под мостом принимается равной критической глубине  $h_k$  и расчет продолжается в следующей последовательности.

5. Из формул для расхода  $Q = \omega V_d$  и площади живого сечения подмостового потока  $\omega = \varepsilon b h_k$  определяется отверстие моста (рис. 1.1, б):

$$b = Q / (\varepsilon h_k V_d), \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon = b_c / b$  – коэффициент сжатия потока в плане; для устоев с конусами  $\varepsilon = 0.90$ , для выступающих из конуса устоев  $\varepsilon = 0.80$ ;

$b_c$  – ширина потока в сжатом сечении (рис. 1.1, б).

6. Принимается ближайшее к найденному  $b$  большее значение отверстия  $b_T$  из типового ряда отверстий мостов.

7. Пересчитывается скорость под мостом для принятого типового отверстия моста

$$V_T = (Q g / (\varepsilon b_T))^{1/3}. \quad (1.3)$$

8. Определяется вновь критическая глубина

$$h_{к.т} = V_T^2 / g. \quad (1.4)$$

9. Проверяется сохранение схемы протекания воды под мостом  $h_6 < 1,3 h_{к.т}$ .

10. Подсчитывается глубина воды перед мостом

$$H = h_{к.т} + V_T^2 / (2 g \varphi^2), \quad (1.5)$$

где  $\varphi$  – коэффициент скорости; для устоев с конусами  $\varphi = 0,90$ , для выступающих из конуса устоев  $\varphi = 0,85$ .

11. Находится минимальная высота моста  $H_M$  (рис. 1.1)

$$H_M = H + Z + C, \quad (1.6)$$

где  $Z$  – возвышение низа пролетного строения над уровнем воды перед мостом,  $t = 0,5 - 1,0$  м;

$C$  – конструктивная (строительная) высота пролетного строения.

### ***II случай – $h_6 > 1,3 h_{к}$ - несвободное истечение***

При несвободном истечении под мостом устанавливается бытовая глубина и отверстие моста определяют по формуле:

$$b = Q / (\varepsilon h_6 V_d). \quad (1.7)$$

Затем принимается ближайшее к  $b$  большее типовое отверстие моста  $b_T$ , пересчитывается скорость под мостом для принятого отверстия моста

$$V_T = Q / (\varepsilon h_6 b_T) \quad (1.8)$$

и определяется глубина воды перед мостом

$$H = h_6 + V_T^2 / (2 g \varphi^2). \quad (1.9)$$

**Расчет малого моста по глубине в сжатом сечении.** Схема протекания воды под мостом с образованием сжатого по вертикали сечения с глубиной  $h_c$  (см. рис. 1.1, а) встречается реже. Она характерна для относительно широких ( $\delta / H > 10$ ) водосливов, для отверстий мостов малых пролетов и труб. В этом случае приближенная расчетная формула для расхода при свободном истечении через прямоугольное отверстие малого моста (аналогия – водослив с широким порогом) имеет вид:

$$Q = \varphi h_c b (2 g (H - h_c))^{1/2} = 1,33 b H^{3/2}, \quad (1.10)$$

где глубина в сжатом сечении принята  $h_c = 0,5H$ , коэффициент скорости  $\varphi = 0,85$ , ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

Последовательность расчета с использованием этой формулы:

1) по допускаемой скорости для выбранного типа укрепления русла под мостом вычисляют напор по формуле  $H=1,45V_d^2/g$ ;

2) определяют ширину отверстия  $b = Q / (1,33 H^{3/2})$  и выбирают его типовое значение  $b_T$ ;

3) подсчитывают напор (глубину воды перед сооружением) по полученной из (1.10) формуле  $H=0,83(Q/ b_T)^{2/3}$ .

*Примечание.* Если расчеты выполнять в сантиметровых размерах, тогда в (1.10) следует принять  $g = 981 \text{ см/с}^2$ , откуда

$$H = 0,18 (Q/ b_T)^{2/3}. \quad (1.11)$$

## 1.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на устройстве №8 в следующем порядке.

1. Привести устройство в исходное состояние. Для этого установить его на стол так, чтобы канал с моделью неподтопленного моста находился сверху, как показано на рис. В, а. Подождать, пока вся жидкость перетечёт в нижний бак.

2. Перевернуть устройство в вертикальной плоскости, наблюдать свободное истечение под моделью моста, измерить геометрический напор  $H$  (см. рис. 1.1) перед мостом, глубину потока после моста  $h_6$  и время  $t$  изменения уровня воды в баке со шкалой на произвольно выбранную величину  $S$ , например, на 5см. Если за время опорожнения верхнего бака не удалось произвести все указанные замеры, то действия по п.п. 1, 2 повторить.

3. Результаты измерений и размеры ( $A$ ,  $B$ ,  $b$ ), указанные на корпусе устройства №8, занести в таблицу 1.1.

4. Сделать вычисления по формулам, соответствующим наблюдаемой схеме течения, и сравнить измеренное  $H$  и расчётное  $H_p$  значения напора перед мостом.

5. Перевернуть устройство №8 в вертикальной плоскости, наблюдать подтопленное истечение через отверстие моста и выполнить все действия по п.п. 2-4.

Таблица 2.1

№ п/п	Наименование величин	Обозначение, формулы	Значения величин	
			<i>I случай</i>	<i>II случай</i>
1.	Бытовая глубина, см	$h_6$		
2.	Измеренный напор, см	$H$		
3.	Изменение уровня в баке, см	$S$		
4.	Время изменения уровня, с	$t$		
5.	Расход воды, см <sup>3</sup> /с	$Q=ABS/t$		
6.	Критическая глубина, см	$h_k=(\alpha Q^2/(\varepsilon g b^2))^{1/3}$		
7.	Критерий подтопления	$h_6 < = > 1,3 h_k$		
7.	Расчетная глубина под мостом, см	$h_m = h_k$ или $h_m = h_6$		
8.	Скорость под мостом, см/с	$V_m = Q/(\varepsilon h_m b)$		
10.	Напор расчетный, см	$H = h_m + V_m^2/(2g\varphi^2)$		
11.	Напор расчетный при $h_m = h_c$ , см	$H = 0,18 (Q/b_T)^{2/3}$		—————

Размеры сечения бака:  $A = \dots$  см,  $B = \dots$  см; ширина опытного канала (отверстия модели моста)  $b = \dots$  см; коэффициент Кориолиса  $\alpha = 1.1$ ; ускорение свободного падения  $g = 981 \text{ см/с}^2$ .

*Примечание.* Принять  $\varepsilon = 0,9$ ;  $\varphi = 0,9$ .

## РАБОТА 2. ИЗУЧЕНИЕ МОСТОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

**Цель работы.** Изучение схемы течения воды и видов размыва русла на мостовом переходе.

### 2.1. Общие сведения

**Состав мостового перехода.** Автомобильные и железные дороги пересекают многочисленные водные препятствия: реки, ручьи, периодические водотоки и водохранилища ГЭС. Для преодоления водного препятствия строят систему сооружений – мостовой, тоннельный или паромный *переход водотока* (водного препятствия).

*Мостовой переход* включает мост (пролетное строение и опоры), подходы к мосту (земляные насыпи, эстакады), регуляционные (струенаправляющие дамбы) и берегозащитные сооружения.

*Мосты* длиной до 25 метров обычно называют *малыми*, от 25 до 100 – *средними* и свыше 100 – *большими*. Следует заметить, что в гидравлике все мосты с размываемыми (неукрепленными) подмостовыми руслами условно называются *большими*. Укрепленные русла при большой ширине менее целесообразны по сравнению с сооружением опор, запроектированных с учетом глубины размыва русла. Мост обычно перекрывает полностью коренное русло, где движение воды происходит круглогодично, а также может частично перекрывать поймы, которые покрываются водой во время паводка.

*Подходы к мостам* от берегов речной долины обычно выполняют в виде земляных *насыпей*, которые перекрывают частично или полностью поймы реки (рис. 2.1, а). Между насыпями оставляют водопропускное отверстие, перекрываемое мостом. Оно называется *отверстием моста*. За ширину отверстия моста принимают расстояние между насыпями на отметке расчетного уровня воды и обозначают ее через  $B_m$ . Насыпи заканчиваются конусами, полностью или частично закрывающими крайние опоры моста – *устои*.

*Регуляционные сооружения* имеют различную форму и конструкцию. Они позволяют сделать неизбежные русловые деформации безопасными для сооружений мостового перехода. Например,

чтобы разгрузить пойменные участки отверстия моста от излишнего количества воды и исключить опасный размыв у конуса насыпи, применяют струенаправляющие дамбы 2. Благодаря им поток на подходе к подмостовому руслу становится симметричным, а распределение удельных расходов по ширине – более плавным.

*Берегозащитные сооружения* исключают перемещение берегов русла с течением времени, которое может привести к неблагоприятному расположению судового хода относительно опор моста или может угрожать устойчивости струенаправляющих сооружений и подходных насыпей на поймах. Берегозащитные сооружения могут быть выполнены в виде *продольного вала* с подошвой, защищенной от подмыва (например, гибким покрытием, опускающимся в размыв по мере его развития) или в виде струеотбойных поперечных сооружений – *траверсов*, размещаемых по длине берега, если ставится задача не только защитить берег, но и отодвинуть береговую линию в сторону реки.

**Схема потока, стесненного сооружениями мостового перехода**, показана на рис. 2.1, а.

Ось (створ) мостового перехода II-II обычно расположена нормально к направлению течения. В этом случае ширина отверстия (длина) моста является наименьшей.

Сооружения мостового перехода представляют собой местное гидравлическое сопротивление. Они стесняют речной поток и вызывают перед собой увеличение отметок свободной поверхности, т.е. создают *подпор*  $\Delta Z$  перед мостом (рис. 2.1, б). Подпор распространяется вверх по течению до створа I-I, выше которого влияние моста на речной поток не сказывается, т.е. бытовые условия перед мостом не нарушены.

По мере приближения к отверстию моста струи сходятся, а свободная поверхность понижается и имеет форму воронки (ее дугообразная граница на рис. 2.1, б показана сплошной линией). Вдоль насыпи уровень воды также уменьшается к отверстию моста.

Уменьшение ширины потока в пределах воронки приводит к увеличению скоростей течения, которые достигают наибольших

а) течения под мостом. В отверстии моста поток претерпевает

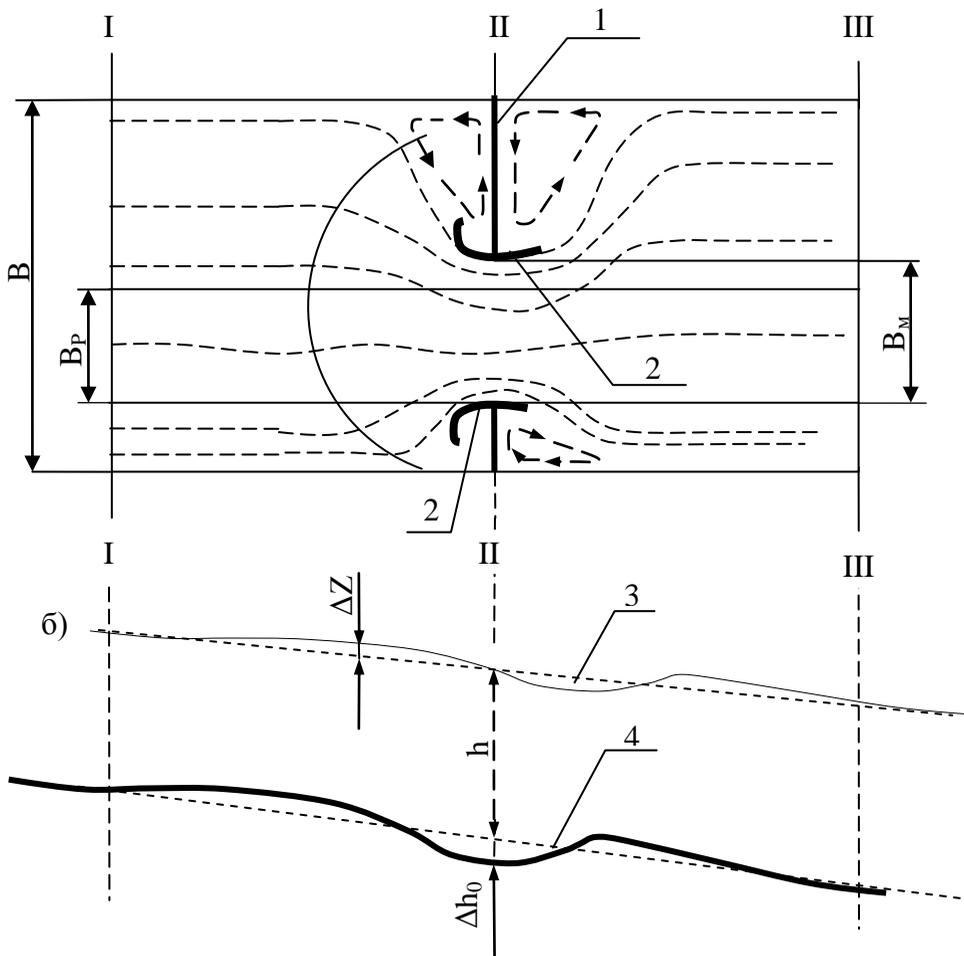


Рис. 2.1. План (а) и продольный профиль (б) водотока на участке с мостовым переходом:

- 1 – подходная насыпь; 2 – струенаправляющие дамбы;
- 3, 4 – свободная поверхность и дно водотока в естественном (бытовом) состоянии

наибольшее сжатие, его струи параллельны между собой, а уровень воды *близок к бытовому*.

За мостом поверхность воды имеет вид бугра, поток расширяется (растекается), струи расходятся, и скорости потока уменьшаются. За границей крайних транзитных струй образуются обширные водовороты (циркуляционные области). За сечением III-III происходит восстановление бытовых (естественных) условий водотока.

**Общий размыв подмостовых русел.** После возведения мостового перехода (рис. 2.1 и 2.2) весь расход речного потока  $Q$  будет проходить через подмостовое русло. В результате стеснения речного потока подходными насыпями от ширины реки  $B$  до ширины отверстия моста  $B_m$  скорости потока в подмостовом русле возрастают по сравнению со скоростями потока в его естественном (бытовом) состоянии и могут стать существенно больше размывающих скоростей. Это приводит к нарушению баланса наносов на участке мостового перехода с их выносом из подмостового русла и отложением их ниже по течению (см. рис. 2.1, б). В подмостовом русле будет происходить увеличение глубин за счет размыва и, следовательно, уменьшение скоростей течения. Русло стабилизируется только после восстановления баланса наносов на участке мостового перехода.

Увеличение глубин размыва  $\delta$  (см. рис. 2.2, б) произойдет по всей ширине  $B_{p.m.}$  подмостового русла. Этот вид русловых деформаций называют *общим размывом*. Глубина общего размыва  $\Delta h_0$  представляет собой разность отметок дна русла до и после размыва или разность глубин потока в русле после ( $h_{p.m.}$ ) и до размыва ( $h_{p.б.}$ )

$$\Delta h_0 = h_{p.m.} - h_{p.б.} \quad (2.1)$$

Среднюю глубину под мостом  $h_m$  после размыва можно определить из формулы расхода реки при пике паводка

$$Q = V_m \omega_m = V_m B_m h_m \varepsilon$$

через среднюю скорость  $V_m$  и площадь живого сечения  $\omega_m = B_m h_m \varepsilon$  водного потока под мостом

$$h_m = Q / (V_m B_m \varepsilon), \quad (2.2)$$

где  $B_m$  – ширина отверстия моста,

$\varepsilon$  – коэффициент сжатия потока подходными насыпями и опорами моста.

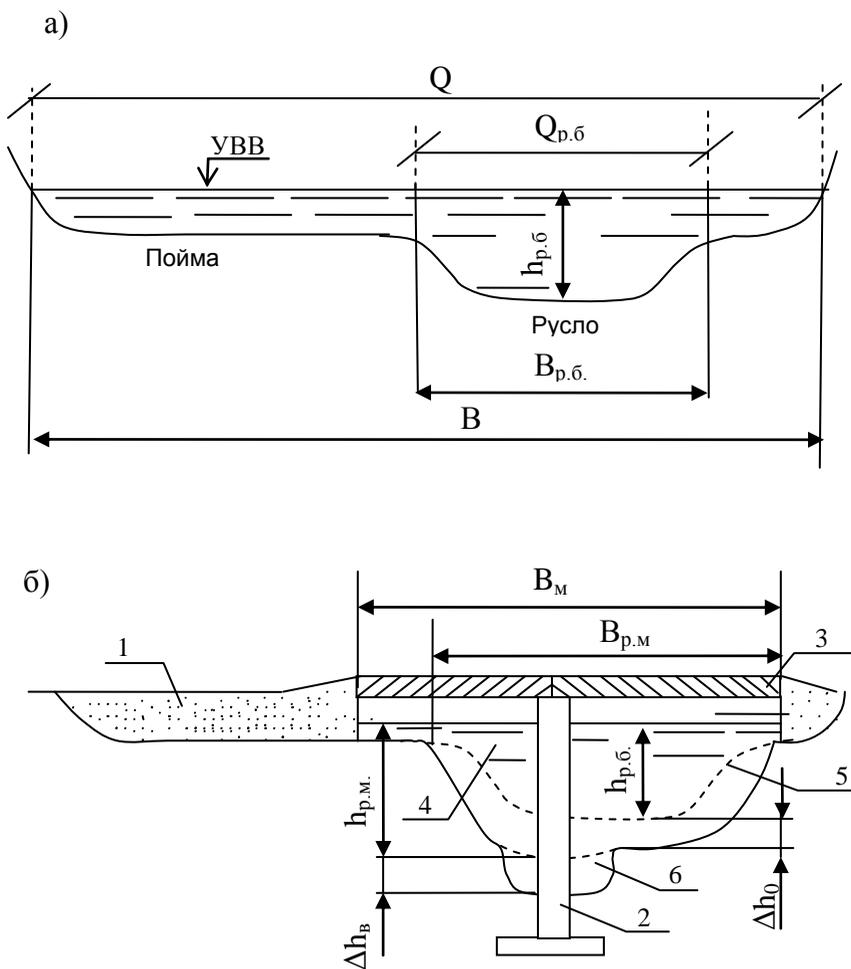


Рис. 2.2. Поперечный профиль водотока в естественном (а) и стесненном (б) состояниях: 1 – подходная насыпь; 2 – опора; 3 – пролетное строение; 4 – профиль дна реки в естественном (бытовом) состоянии; 5 – общий размыв; 6 – местный

Среднюю скорость  $V_m$  потока под мостом обычно принимают равной средней скорости потока  $V_{p.б.}$  в русле до сооружения мостового перехода (по методу Н. А. Белелюбского, 1875 год)

$$V_m = V_{p.б.} = Q_{p.б.} / (h_{p.б.} B_{p.б.}) \quad (2.3)$$

или равной скорости, при которой восстанавливается продольный баланс наносов, т. е. равенство бытового расхода наносов и расхода наносов в стесненном (сжатом) створе (сечении) под мостом (по методу О. В. Андреева, 1955 год)

$$V_m = V_{p.б.} (B_{p.б.} / B_{p.м.})^{1/4} (h_{p.м.} / h_{p.б.})^{1/8}. \quad (2.4)$$

Обычно стоимость единицы длины подходов к мосту значительно ниже стоимости единицы длины моста, что побуждает при проектировании увеличивать длину подходов и за счет этого уменьшать длину (ширину отверстия  $B_m$ ) моста. В этом случае сокращается не только длина дорогих пролётных строений, но и уменьшается число опор моста. Однако это вызывает увеличение подпора перед мостом и подтопление сооружений. Кроме того, как видно из (2.2), чем меньше ширина отверстия моста  $B_m$ , тем больше будет глубина под мостом  $h_m$  и, следовательно, глубина общего размыва. Размывы угрожают устойчивости моста и насыпей подходов. Эксплуатация перехода затрудняется, а иногда становится невозможной. Поэтому в целях отыскания оптимального решения можно изменять значения  $B_m$  и  $h_m$  в ходе технико-экономического расчета. Кроме того, строительными нормами установлены предельные коэффициенты общего размыва  $P = h_{p.м.} / h_{p.б.}$  (1.5 – для судоходных рек; 2.0 – для несудоходных рек), что также ограничивает уменьшение  $B_m$ .

Отыскание оптимальной степени стеснения реки переходом, соответствующей минимуму суммарных затрат на строительство и содержание сооружений, является существенной частью решения задачи по определению генеральных размеров сооружений.

**Местный размыв подмостового русла б** (см. рис. 2.2, б) – возникает у опор и вызван изменением структуры потока около них, что выражается в увеличении скоростей сбоку опор и в возникновении циркуляционных течений. Наибольшая глубина местного размыва (глубина воронки)  $\Delta h_B$  образуется перед опорой.

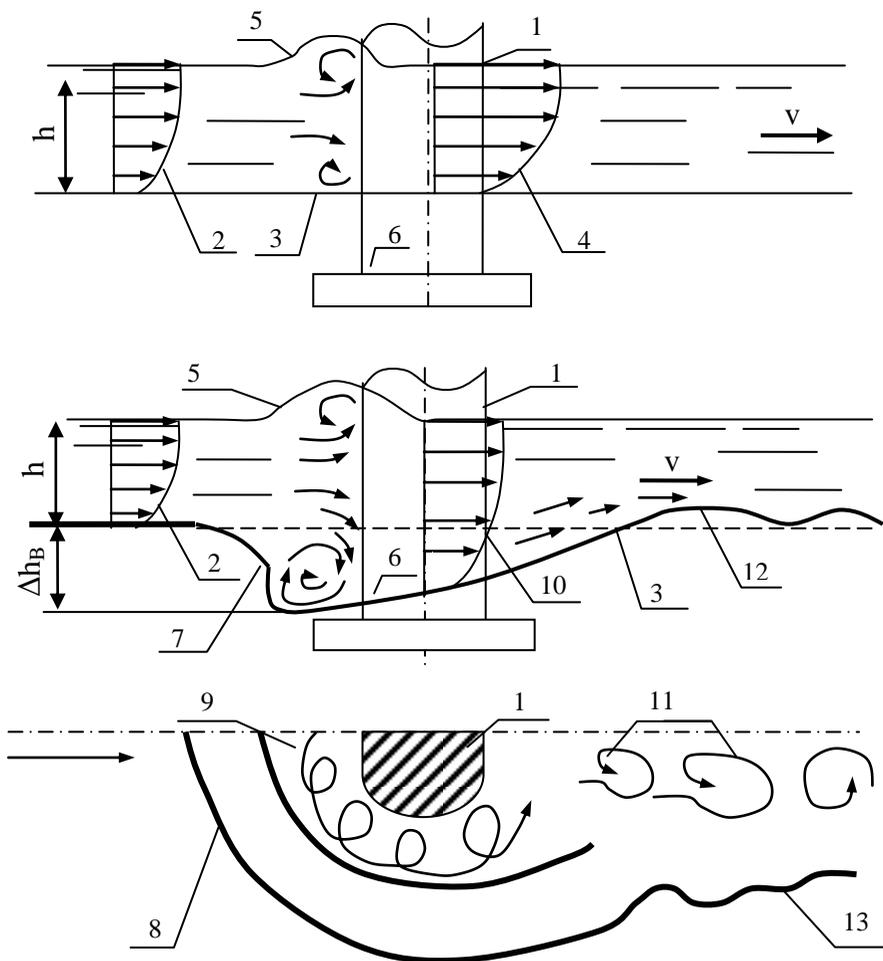


Рис. 2.3. Схема образования воронки размыва около цилиндрической опоры:

- а) продольный профиль русла до размыва;
- б) продольный профиль русла после размыва;
- в) план воронки размыва

При определении отметки заложения фундамента опор учитывается общий и местный размыв.

Глубина водотока после размыва у опоры:

$$h = h_{p.б.} + \Delta h_0 + \Delta h_B, \quad (2.5)$$

где  $h_{p.б.}$  – бытовая глубина в русле ( до сооружения моста ) ;

$\Delta h_0$  – глубина общего размыва ;

$\Delta h_B$  – глубина местного размыва.

### **Схема образования воронки размыва и расчет ее глубины.**

Рассмотрим процесс образования воронки размыва около цилиндрической опоры. На некотором расстоянии выше по течению опора 1 ещё не возмущает поток и не влияет на эпюру скоростей 2 (рис.2.3). При обтекании потоком опоры происходит нарушение кинематической структуры потока. Сбоку опоры скорости увеличиваются почти в 2 раза при условии жёсткого дна 3 (эпюра 4). Ударяющийся в опору поток разбивается на струи, которые отклоняются вправо и влево от опоры, вверх и вниз вдоль опоры.

Восходящие струи образуют на поверхности воды подпор, который вызывает циркуляцию жидкости в виде поверхностного вальца 5 с горизонтальной осью. Нисходящие струи формируют донный

валец 6 с горизонтальной осью вращения, что и является причиной образования воронки размыва 7, 8 у опоры.

Донный валец благодаря боковым струям приобретает подковообразную форму 9 и вырабатывает углубление в дне воронки размыва с большой крутизной откосов. Наибольшая глубина размыва  $\Delta h_B$  образуется перед опорой. Она и представляет наибольший практический интерес.

После образования воронки размыва глубина потока около опоры увеличивается, что приводит к уменьшению скорости обтекания опоры (эпюра скорости 10) и стабилизации размыва около опоры.

За опорой образуется зона с пониженным давлением (уровнем), где может образовываться застойная зона (при малых скоростях потока), парный вихрь или вихревая дорожка 11. За воронкой наносы откладываются в виде гряд намыва (песчаных волн) со сложным продольным профилем 12 и контуром в плане 13 .

Основная задача расчета местного размыва у опор мостов сводится к определению глубины воронки, которая обычно увеличивается с ростом скорости потока, его глубины и ширины опоры.

Ввиду сложности явления обтекания опор с деформируемым дном, к настоящему времени для определения глубины воронки размыва предложено около 30 расчётных зависимостей, по-разному учитывающих влияние действующих факторов.

Следует помнить, что размыв у опоры начинается при скорости течения в русле  $V < V_{н.р.}$ , когда скорость перед опорой  $V$  почти в 2 раза меньше скорости  $V_{н.р.}$  ( $V_{н.р.}$  – средняя неразмывающая скорость не возмущенного опорой потока).

**Расчет подпоров на мостовых переходах.** Определение подпоров имеет важное практическое значение для назначения отметок насыпей подходов, струенаправляющих дамб, траверсов, для прогнозирования возможного затопления ценных земель и прибрежных населенных пунктов.

Полный подпор  $\Delta Z$  (см. рис. 2.1,б) можно определить по выражению О. В. Андреева, полученного на основе уравнение Бернулли для двух створов мостового перехода с использованием формулы Шези.

## 2.2. Порядок выполнения работы

1. Поставить устройство №9 (см. рис. В, б) вертикально на стол так, чтобы надпись «мостовой переход в плане» на лицевой стороне устройства была перевернута, и подождать, когда верхний бак опорожнится.
2. Перевернуть устройство в его вертикальной плоскости, наблюдать картину течения воды на мостовом переходе в плане, зарисовать и описать ее.
3. Перевернуть еще раз устройство в его вертикальной плоскости, наблюдать на обратной стороне устройства картину течения воды около мостовой опоры и механизм образования воронки размыва (см. рис. В, в).
4. Зарисовать структуру потоков около опоры и описать процесс образования местного размыва.

## РАБОТА 3. ИЗУЧЕНИЕ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

*Цель работы.* Изучить типы русловых процессов и особенности их учета при назначении створа моста.

### 3.1. Общие сведения о русловых процессах

**Необходимость прогнозирования русловых процессов.** Очень важно уметь прогнозировать природные русловые деформации рек, которые могут произойти в течение срока службы мостового перехода (составляет около 80 лет).

Деформации живых сечений русла прогнозируются для установления на стадии проектирования наиболее неблагоприятных условий работы опор моста, подходов к нему и регуляционных сооружений, а также для решения вопроса о расположении моста в плане.

В тех случаях, когда при проектировании мостового перехода деформации русла не учитываются, иногда создаются весьма неблагоприятные условия работы перехода. Например, если при проектировании перехода не учтено боковое перемещение русла в результате процесса меандрирования, то может возникнуть угроза подмыва опоры и нарушения устойчивости мостового перехода.

При проектировании мостового перехода необходимо знать тип руслового процесса на данном участке реки. Сведения о деформациях русел проектировщики могут получить в организациях, связанных с использованием данной реки. Если мостовой переход проектируется через судоходную реку, то необходимые сведения можно получить в бассейновых управлениях и в технических участках водного пути Министерства речного флота.

Картографические и аэрофотосъемочные материалы позволяют установить тип руслового процесса и дать качественный прогноз возможных деформаций русла на будущий период. При производстве изысканий мостового перехода тип руслового процесса устанавливаются путем осмотра участка реки в натуре. Сведения о характере русловых деформаций (о развитии излучин, перемещении побочней, образовании протоков и т. д.) можно получить от старожилов, проживающих в прибрежных районах (бакенщиков, паромщиков, рыбаков).

**Общие сведения о реке.** Река – водный поток (водоток) в разработанном им русле в углублениях земной поверхности. Она имеет *исток* – начало и *устье* – место впадения реки в море, озеро, водохранилище, другую реку.

Река протекает по пониженной части бассейна – долине, выработанной в ходе многовековой деятельности самой рекой. Долина имеет склоны 1 и дно 2 (рис. 3.1) и обычно заполнена слоем продуктов разрушения земной коры (ил, песок, гравий, валуны). Они перемещаются потоком и называются аллювием или *наносами* 3. Слой наносов прорезан *руслом* 4, в котором сосредоточен речной поток в маловодные периоды (в межень). *Поймой* 5 называется часть долины, затопливаемая только в многоводные периоды (во время паводков и половодий). Поймы обычно имеют плоскую поверхность и покрыты травяной и кустарниковой растительностью.

В течение тысячелетий русла рек размываются текущей водой и поэтому меняют свою форму как в поперечном сечении, так и в плане (блуждают в пределах долины).

**Виды морфологических структурных образований.** Изменение морфологического (от греч. – форма) строения русла водотока под действием текущей воды называют *русловым процессом*.

Главными факторами формирования речного русла являются руслоформирующий расход воды, уклон водотока, средняя крупность руслоформирующих каналов. За руслоформирующие расходы принимают расходы воды при заполнении русла до его бровки. Руслоформирующий расход может определяться и для каждого типа руслового процесса.

Русловые процессы подразделяются на необратимые (однонаправленные) и обратимые (циклические).

**Необратимые** русловые процессы обусловлены однонаправленным вековым развитием морфологических характеристик реки, относящихся главным образом к продольному профилю реки.

**Обратимыми** русловыми процессами являются сезонные изменения рельефа дна реки на перекатах и плесах, перемещение песчаных гряд, побочней, осередков, подмывы и намывы берегов, меандрирование, возникновение протоков и их отмирание.

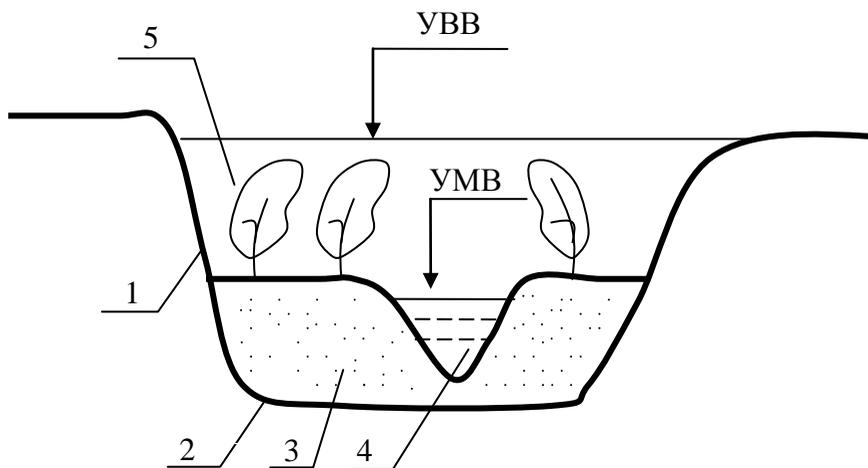


Рис. 3.1. Долина реки: 1,2 – склон и дно долины; 3 – наносы; 4 – русло; 5 – пойма

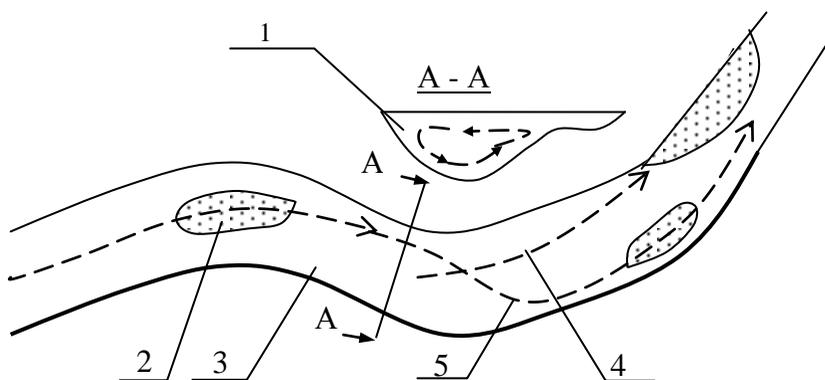


Рис. 3.2. Русло реки в плане: 1 – поперечная циркуляция; 2 – плес; 3 – побочень; 4 – гребень переката; 5 – фарватер

В настоящее время при проектировании мостовых переходов и других гидротехнических сооружений применяют классификацию русловых процессов, разработанную в Государственном гидрологическом институте Н.Е. Кондратьевым и И.В. Поповым. Речные морфологические структурные образования подразделяют на три группы:

*микроформы* – мелкие песчаные гряды, размеры которых во много раз меньше глубины и ширины потока в русле;

*мезоформы* – сравнительно крупные подвижные песчаные скопления в русле реки (ленточные гряды, побочни и осередки);

*макроформы* – сложный комплекс морфологических образований, которые определяют внешний вид русла (пары плес-перекат, излучины, пойменные массивы).

Макроформы и мезоформы определяют тип руслового процесса.

***Русловой комплекс перекат-плёс.*** В плане речное русло имеет прямолинейные участки и изгибы, называемые *излучинами* (меандрами). На крутых излучинах поверхностные струи воды ударяются в вогнутый берег, отражаются от него и направляются вниз, а затем около дна к противоположному выпуклому берегу, вызывая поперечную циркуляцию 1 в водотоке (рис. 3.2). Винтовой характер течения вызывает следующие процессы: *размыв* вогнутого берега и дна русла и, как следствие, формирование крутых берегов и глубоких участков около них, называемых *песами* 2; *перенос* продуктов размыва (наносов) к противоположному берегу и скопление их в виде гряд, называемых *побочнями* 3. При спаде уровня скопление донных наносов на выпуклом берегу речной излучины обнажается и в этом случае называется *пляжем* или *косой*.

На участках перехода реки из излучины одного в излучину другого направления образуется *перекат* 4 – форма донного рельефа в виде гряды наносов, пересекающей русло. Линия наибольших глубин вдоль реки называется *фарватером* 5.

Плановые деформации речных излучин, возникающие в результате взаимодействия русла с речным потоком, называют *меандрированием русла*.

**Типы русловых процессов.** Деформации русла и поймы реки, возникающие в результате сочетания особенностей водного режима и стока наносов, обуславливают *тип руслового процесса*. Различают следующие типы русловых процессов рек (рис. 3.3).

1. *Ленточно-грядовый* – в русле происходит движение системы поперечных гряд, занимающих всю ширину русла и искривленных в плане под влиянием придонных скоростей. Гряды называются ленточными потому, что в плане они напоминают волны, которые образуются при упражнениях с лентой. Расстояние между ними обычно больше ширины русла в 6...8 раз, их высота может достигать 3 м, а средняя скорость перемещения гряды – 200...300 м/год. Поэтому за срок службы моста через его отверстие проходит много гряд, что необходимо учитывать при расчете размыва.

Ленточные гряды наблюдаются на реках Обь, Ока, Томь и обычно формируются на слабо извилистых участках реки. В таких местах плановые деформации берегов русла незначительны, поэтому при проектировании мостового перехода ими обычно пренебрегают и регуляционные сооружения не устраивают. Створ мостового перехода располагают нормально к руслу.

2. *Побочневый* – по сравнению с предыдущим типом гребни гряд перекошены, направление перекосов смежных гряд чередуются. В меженный период повышенные части гряд обнажаются у берегов. В результате образуются постепенно сползающие вниз по течению побочни (песчаные отмели), расположенные в шахматном порядке. Это способствует извилистости меженного русла.

Побочневый тип руслового процесса наблюдается тогда, когда водный поток не способен перемещать донные наносы в форме одиночных ленточных гряд. В качестве примера реки с побочневым типом руслового процесса можно привести Обь, Оку, Амур.

Шаг побочней превышает ширину меженного русла примерно в 6 раз. Изменение отметок гряд и побочней за гидрологический сезон составляет от 0,1 до 4 м. Для Оби средняя скорость перемещения побочня составляет 100...900 м/год.

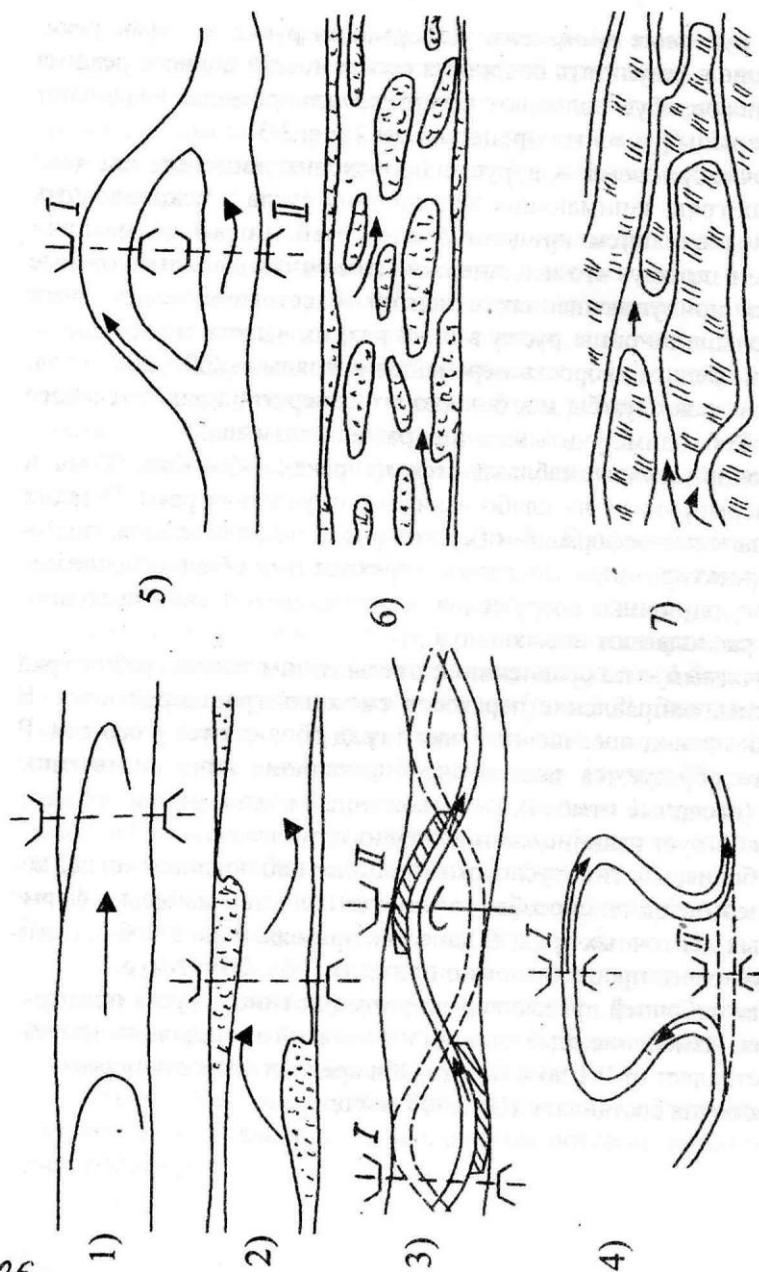


Рис. 3.3. Типы русловых процессов: 1) ленточно-рядовый; 2) побочный; 3) ограниченное меандрирование; 4) свободное меандрирование; 5) незавершенное меандрирование; 6) русловая многорукость; 7) пойменная многорукость

Створ мостового переходу при такому типе русел цілесообразно розпорядитися перпендикулярно к коренному руслу в бровках не-

зависимо от положения меженного русла. Отверстие моста следует назначать равным не менее ширины русла в его бровках. В противном случае стеснение коренного русла подходными насыпями приведет к образованию сосредоточенного размыва у конусов и устоев моста в период прохождения побочней через створ мостового перехода. Необходимо учитывать, что движение побочней приводит к переформированию живого сечения потока. Так, если под мост сползает правобережный побочень, то наибольшие глубины образуются у левого берега и наоборот. Средняя часть русла находится в более стабильном положении: через нее всегда проходят перекатные участки гряд.

3. *Ограниченное меандрирование* – (в этом случае в плане русло имеет слабо извилистую форму, близкую к синусоидальной). Для этого типа руслового процесса характерно сползание слабо выраженных излучин по течению реки без существенных изменений их плановых очертаний и размеров, то есть русло перемещается параллельно самому себе (см. рис. 3.3). В процессе сползания излучин происходят деформации не только русла, как в вышерассмотренных типах, но и поймы. Поэтому извилистость потока наблюдается не только в меженный период, но и в паводок. Шаг излучин превышает ширину меженного русла в 6...8 раз. Скорость движения излучин очень мала (5 – 15 м/год).

Такое меандрирование наблюдается на реках Обь, Иртыш, Ока в местах, где развитие излучин (меандр) ограничено склонами долин, уступами древних террас и береговыми валами, сложенными неразмываемыми породами.

В случае ограниченного меандрирования возможны 2 варианта мостового перехода. В первом случае мост полностью перекрывает пойму реки, то есть весь пояс меандрирования. Тогда опоры выполняются цилиндрическими, так как вследствие сползания излучин русловой поток в различные годы будет подходить к опорам под разными углами. Во втором случае укрепляются подмываемые вогнутые берега верховой и пересекаемой излучин и мост имеет значительно меньшую длину по сравнению с первым вариантом.

4. *Свободное меандрирование* – русло реки сильно меандрирует в широкой пойме со староречьями. В отличие от всех рассмотренных выше типов, здесь каждая излучина проходит определенный цикл

развития. Вначале излучина имеет форму синусоиды. Затем ее участки разворачиваются вокруг точек перегиба, образуя подковообразную петлю русла из двух излучин. Подмываемые вогнутые берега верховой и низовой излучин сближаются. После прорыва перешейка между смежными излучинами во время одного из паводков петля отделяется от нового русла и образует старицу, которая имеет в плане характерную серповидную форму, затем начинает развиваться новая излучина. С увеличением затопляемости речных пойм отторжение излучин может происходить на более ранних этапах развития.

Этот тип руслового процесса наблюдается на небольших равнинных реках, имеющих широкие поймы. Свободное меандрирование может также встречаться на некоторых участках больших рек, например, Оби, Оки, Иртыше. Скорость смещения берегов при этом составляет от нескольких метров до десятков метров в год.

На реках со свободным меандрированием целесообразно пересекать русло в середине хорошо развитой излучины, прижатой к одному из коренных берегов долины. Если верховая и низовая излучины образуют узкий перешеек, то следует рассматривать два варианта устройства моста: на излучине русла с закреплением вогнутых берегов сближающихся излучин и на искусственном русле (спрямляющем канале), соединяющем эти излучины.

5. *Незавершенное меандрирование* – при этом типе руслового процесса излучина развивается по типу свободного меандрирования, но не доходит до состояния петли, так как на пойме образуется спрямляющий проток и река делится на два рукава. Этот тип руслового процесса наблюдается на реках, имеющих широкую, часто затопляемую и легко размываемую пойму, а также на многих участках крупных равнинных рек (Обь, Иртыш, Ока).

Мост располагается или на излучине, или на спрямляющем протоке, а противоположное русло перекрывается запрудой.

6. *Русловая многорукавность (осередковый тип)* – этот тип руслового процесса возникает при больших расходах донных наносов, которые аккумулируются в русле. Во время половодья наносы перемещаются по всей ширине распластанного русла в виде системы больших разобщенных гряд, образующих в межени небольшие ост-

рова (осередки), между которыми расположены короткие извилистые протоки (рукава).

Такой тип руслового процесса можно рассматривать как развитие ленточно-грядового типа. Он характерен для рек Лена, Северная Двина, Катунь.

Мостовой переход трассируется нормально к границам коренного русла в месте с наименьшей шириной и устраивается либо с отверстием на всю ширину бровки коренного русла, либо у одного из берегов с устройством специальных регуляционных сооружений и подходных насыпей. Ввиду высокой строительной стоимости мостового перехода на участке с осередковым типом, рекомендуется рассматривать вариант трассы в обход с пересечением реки в ближайшей теснине, где русло не разбивается на рукава.

*7. Пойменная многорукавность* – этот тип руслового процесса является последующим развитием незавершенного меандрирования, возникает в широких поймах и характеризуется наличием множества рукавов, между которыми располагаются устойчивые острова, представляющие собой большие участки поймы. Рукава рассматриваются как самостоятельные русла, которые могут иметь любой из описанных выше типов. Так, например, на большинстве протоков р. Оби наблюдается меандрирование, а на некоторых протоках – осередковый тип руслового процесса и сравнительно редко – побочневый.

На реках с пойменной многорукавностью рекомендуется как можно меньше стеснять водный поток, для чего целесообразно на наиболее мощных протоках устраивать дополнительные мосты.

Многие русловые процессы на реках представляют собой промежуточные формы перечисленных процессов.

Следует отметить, что каждая река, как правило, имеет несколько типов русловых процессов. Например, Томь (берет начало с гор Абаканского хребта) в верхнем своем течении имеет немеандрирующее одорукавное русло (осередковый тип), ограниченное меандрирование и пойменную многорукавность (незавершенное меандрирование). В районе Томска и до Оби – ограниченное меандрирование. Река Ушайка имеет свободное меандрирование.

Русловые процессы могут приносить большой вред. Так, многие приречные города и поселки Томской области за период своего существования меняли свои места 3-4 раза. Нарым был построен в

1598 г. в 150 метрах от Оби, но потом был все-таки смыт водой. Позднее он неоднократно переносился в сторону, подальше от реки.

У г. Колпашево за 60 лет разрушена площадь более 6 квадратных километров. Поскольку Обь делает здесь крупную излучину, которая будет развиваться, величина размыва может превысить 6 квадратных километров. На этой площади сейчас находится значительная часть города. Еще в 1968 г. рассматривался один из возможных вариантов защиты берегов Оби у г. Колпашево – путем спрямления русла. Предлагалось уничтожить шейку (перемычку) излучины, длина которой 4 километра. Однако здесь нужно предварительно оценить, что экономически более выгодно: защитить берег или перенести часть города на новое место.

### **3.2. Порядок выполнения работы**

1. Привести устройство №10 в исходное состояние, для чего расположить его в вертикальной плоскости так, чтобы побочный тип руслового процесса был вверху (см. рис. В, з).
2. Перевернуть устройство №10 и наблюдать структуру течения при побочном и осередковом типах руслового процесса.
3. Изобразить контур наблюдаемых русел и картину течения в них.
4. Наметить створы мостовых переходов, описать варианты и особенности их выполнения.
5. Перевернуть устройство №10, наблюдать структуру течения при ограниченном и свободном меандрировании русел, затем выполнить действия по пунктам 2-4.

### ***Список рекомендуемой литературы***

1. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учебник для вузов: Ч.2/ Н. М. Константинов, Н.А.Петров, Л.И.Высоцкий; Под ред. Н. М. Константинова. – М.: Высш. шк., 1987. – 431 с.
2. Железняков Г. В. Гидравлика и гидрология: Учебник для вузов. – М: Транспорт, 1989. – 376 с.
3. Бабков В.Ф. Проектирование автомобильных дорог. Ч.2 / Бабков В.Ф., Андреев О.В. – М.: Транспорт, 1987.– 415 с.
4. Поляков М.П. Проектирование мостовых переходов с учетом типа руслового процесса: Учебное пособие. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 1998. – 89 с.