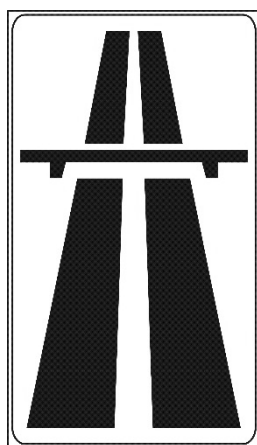


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Автомобильные дороги»

СПЕЦКУРС ГИДРАВЛИКИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов специальности
1-70 03 01 «Автомобильные дороги»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2020

УДК 532:625.7
ББК 30.123:39.311
С71

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Автомобильные дороги» «24» апреля 2020 г.,
протокол № 9

Составитель канд. техн. наук, доц. В. Т. Парахневич

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. В. Михальков

В методических рекомендациях рассматриваются решения задач, которые имеют место при расчете различных аспектов гидравлики дорожных сооружений. В частности, определение критической глубины и критического уклона открытых потоков, гидравлический расчет сооружений для гашения энергии потоков, конструкции и гидравлических расчетов быстротоков, многоступенчатых перепадов, консольных водосбросов. Предназначены к практическим занятиям для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» по дисциплине «Спецкурс гидравлики дорожных сооружений».

Учебно-методическое издание

СПЕЦКУРС ГИДРАВЛИКИ ДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ответственный за выпуск	В. В. Кутузов
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.- изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

Введение.....	4
1 Равномерное движение воды в каналах.....	5
2 Критическая глубина и критический уклон. Бурное и спокойное состояние потока.....	11
3 Гидравлический прыжок	13
4 Уравнение Бахметева	15
5 Водосливы.....	18
6 Сопряжение бьефов.....	19
7 Сооружения для гашения энергии потока.....	22
8 Перепады и быстротоки.....	25
9 Водоотвод с поверхности автомобильных дорог.....	28
10 Водопропускные трубы.....	30
Список литературы.....	32
Приложение А.....	33

Введение

Целью методических рекомендаций является углубление практических знаний, полученных при изучении теоретического материала дисциплины «Спецкурс гидравлики дорожных сооружений».

В методических рекомендациях приводится минимум теоретического материала и методика решения конкретных задач, что позволит студентам приобрести определенные практические навыки. Полученные при этом знания будут полезны будущим специалистам как на этапе проектирования дорог и конкретных дорожных сооружений, так и при их строительстве и эксплуатации. Кроме того, при возникновении негативных моментов в процессе эксплуатации дорог, связанных с гидравлическими явлениями, эти сведения в определенной степени позволят установить их причину и характер воздействия на состояние автомобильной дороги.

В методических рекомендациях рассматриваются задачи по расчету равномерного движения воды в каналах. Как правило, ввиду возникновения тех или иных условий в сооружениях автомобильных дорог равномерное движение воды переходит в неравномерное и наоборот. Поэтому необходимо восстановить сведения предыдущей дисциплины «Гидравлика, гидрология, гидрометрия водотоков» по расчету каналов при равномерном движении воды. Неравномерное движение воды является достаточно сложным в сравнении с равномерным как в отношении расчетов, так и в понимании физической картины. В связи с этим рассматриваются основные характеристики открытых потоков, которые в той или иной степени отражают переход потока из бурного состояния в спокойное (удельная энергия, критическая глубина и критический уклон, параметр кинетичности – число Фруда).

В методических рекомендациях предлагаются задачи, которые позволяют определить или создать условия перехода потока из бурного состояния в спокойное посредством гидравлического прыжка, что способствует устойчивости русел.

Одним из сложных практических вопросов является использование уравнения Б. А. Бахметева для построения кривых свободной поверхности открытых потоков. Этому вопросу также уделяется определенное внимание.

Значительное количество задач в инженерной практике связано с проектированием водосливов (мосты, водопропускные трубы, водосбросные сооружения), в связи с чем излагается методика их решения.

Важным вопросом в гидравлике сооружений является проблема сопряжения бьефов, от которой зависит надежная работа водосбросного или водоотводного сооружения и эксплуатационное состояние дороги. В методических рекомендациях приводятся задачи по созданию благоприятного вида сопряжения бьефов путем устройства водобойных колодцев и водобойных стенок. Водосбросным (быстротоки, перепады) и водопропускным (трубы) сооружениям также уделено значительное внимание.

Для проверки полученных знаний приводятся условия задач для самостоятельного решения задач и контрольные вопросы по теме.

1 Равномерное движение воды в каналах

При равномерном движении воды в каналах наблюдается равновесие сил, вызывающих движение (проекция силы тяжести на направление движения), и сил сопротивления движению (сила трения воды о дно и стенки канала) [5, с. 141].

Различают три типа задач по гидравлическому расчету каналов.

Первый тип. Определение величины расхода воды в канале Q , м³/с. Все остальные характеристики канала известны: уклон дна канала i , площадь живого сечения ω и его характеристики (коэффициент шероховатости n , гидравлический радиус R , м). Задача решается с помощью формулы Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (1.1)$$

где ω – площадь живого сечения, м²; для трапецеидального канала находится по формуле

$$\omega = (b + mh)h ; \quad (1.2)$$

b – ширина канала по дну, м;

h – глубина наполнения канала, м;

m – коэффициент заложения откосов; зависит от рода грунта или вида крепления дна и откоса канала. Выбирается согласно таблице 1.1;

C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с; определяется по формуле Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} ; \quad (1.3)$$

n – коэффициент шероховатости стенок и русла канала; выбирается согласно таблице 1.2.

Гидравлический радиус R , м, вычисляется по формуле

$$R = \frac{\omega}{\chi}, \quad (1.4)$$

где χ – смоченный периметр живого сечения потока, м; для трапецеидальных каналов находится по формуле

$$\chi = b + 2h\sqrt{m^2 + 1}. \quad (1.5)$$

Рассматриваемый тип задач при расчете сооружений практически не встречается. Величина расхода определяется на основании гидрологических расчетов.

Таблица 1.1 – Значение коэффициентов откоса в зависимости от рода грунта и укрепления канала

Вид грунта или укрепление откосов канала	Коэффициент заложения откоса m
Мелкозернистый песчаный	3...3,5
Супесчаный или слабо уплотненный	2...2,5
Плотная супесь и легкий суглинок	1,5...2
Гравелистый и песчано-гравелистый	1,5
Тяжелый суглинок, плотный лесс и обычная глина	1...1,5
Тяжелая плотная глина	1
Скальные породы в зависимости от степени выветривания	0,1...0,5
Облицовка из бетона, асфальтобетона	$\geq 1,25$
Облицовка из гравийной отсыпки и каменной наброски	$\geq 1,5$
Облицовка из глинистых, суглинистых материалов	$\approx 2,5$

Второй тип. Определяется уклон канала i . Все остальные данные известны. Задача решается на основании формулы Шези (1.1):

$$i = \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R}. \quad (1.6)$$

Такой тип задач встречается при проектировании каналов.

Третий тип. Необходимо определить размеры канала (ширину канала по дну b или глубину наполнения h), коэффициент заложения откосов m для каналов зависит от вида грунта (см. таблицу 1.1). При расчете сооружений автомобильных дорог чаще всего приходится находить глубину потока на подходе к сооружению (глубину потока верхнего бьефа $h_{ВБ}$) или после сооружения (глубину нижнего бьефа $h_{НБ}$).

В этом случае известными являются Q , b , i , m , n (расход, ширина канала по дну, уклон дна канала, коэффициенты заложения откосов и шероховатости).

Решение задачи заключается в следующем.

По заданному расходу Q и величине уклона канала i определим необходимую расходную характеристику

$$K_n = \frac{Q}{\sqrt{i}}. \quad (1.7)$$

Решение задачи проводится графоаналитическим способом. Задаются рядом значений h (не менее трех – h_1 , h_2 , h_3) и для каждого из них подсчитывают расходную характеристику K_i по формуле

$$K_i = \omega_i C_i \sqrt{R_i}. \quad (1.8)$$

Таблица 1.2 – Коэффициент шероховатости поверхности каналов

Характеристики стенок и дна канала	<i>n</i>
1	2
Исключительно гладкая поверхность, а также покрытая эмалью или глазурью	0,0009
Цементная стяжка: из чистого цемента оштукатуренная цементным раствором	0,012 0,013
Бетонированная поверхность: наиболее гладкая с тщательной заделкой швов с небольшим количеством закруглений в плане, имеющих большие радиусы без специально гладкой отделки, с удовлетворительно устроенными швами, при закруглении в плане средней величины шероховатые бетонные поверхности с удовлетворительно устроенными швами, при крутых закруглениях бетонирование посредством цемент-пушки без сглаживания поверхности	0,012 0,014 0,016 0,019
Металлическая поверхность: гладкая неокрашенная гладкая окрашенная ржавая, шероховатая, стальная рифленая	0,012 0,013 0,025
Деревянная поверхность: желоб из клепок из продольно расположенных досок или брусьев: строганных нестроганных из поперечно расположенных досок или брусьев: строганных нестроганных	0,012 0,014 0,015 0,015 0,016
Кирпичная и каменная кладка: покрытая глазурью на цементном растворе из тесанного камня бутовая на цементном растворе	0,013 0,015 0,015 0,025
Мощение: из булыжного камня из рваного камня	0,0225 0,0275
Прочие поверхности: брезент по деревянным рейкам грунты, пропитанные битумом или дегтем	0,015 0,018
Каналы в плотном лессе, плотном мелком гравии и плотной земле, затянутой илистой пленкой: при полной планировке дна и откосов при частичной подчистке дна и откосов после землеройной машины при производстве работ машинами без последующей дополнительной планировки	0,019 0,0225 0,025
Большие земляные каналы: в лессе, плотной земле, без наносов, затянутые илистой пленкой в песчаных и супесчаных грунтах, находящиеся в хороших условиях содержания в галечнике с песком	0,019 0,020 0,0225

Окончание таблицы 1.2

1	2
Большие земляные каналы при различных условиях содержания и ремонта: при полной планировке дна и откосов при частичной планировке при производстве работ землеройными машинами без последующей планировки	0,025 0,0275 0,030
Малые земляные каналы при различных условиях содержания и ремонта: при полной планировке дна и откосов при частичной планировке при производстве работ землеройными машинами без последующей планировки	0,0275 0,030 0,035
Большие земляные каналы в плохих условиях: с местными обвалами откосов с местными обвалами откосов, со значительными размывами дна, местами с водорослями, булыжником или гравием по дну, поросшие травой с неправильным профилем	0,025 0,030

Расчет значений расходной характеристики для различных h удобнее проводить в табличной форме (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Расчет глубины наполнения канала h

h , м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , м ^{0,5} /с	K , м ³ /с
h_1	ω_1	χ_1	R_1	C_1	K_1
h_2	ω_2	χ_2	R_2	C_2	K_2
h_3	ω_3	χ_3	R_3	C_3	K_3

При $h_1 = 0$ $K_1 = 0$. Значения ω , χ , R , C и K вычисляются соответственно по формулам (1.2)...(1.5), (1.8). Необходимо, чтобы K_n находился в диапазоне $K_1...K_3$. По данным таблицы строится график $K = f(h)$ (рисунок 1.1). Ось h располагается вертикально.

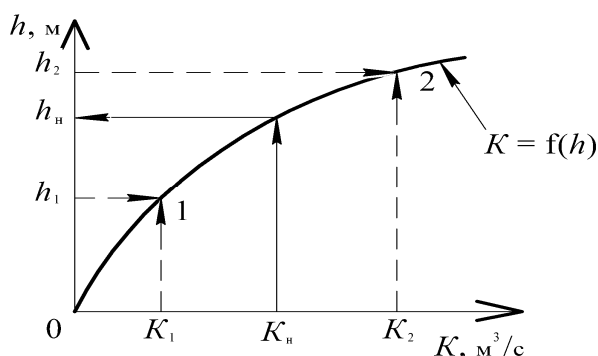


Рисунок 1.1 – Схема определения глубины наполнения канала

Используя значение K_n из (1.7), по кривой $K = f(h)$ находят глубину воды в канале h_n , которая и будет глубиной подводящего к сооружению или отводящего от сооружения русла.

Задача. Уклон канала $i = 1 ‰$, ширина по дну $b = 1,0$ м, коэффициент заложения откосов $m = 2,5$. Определить наполнение канала, если необходимо пропустить расход $Q = 1,4$ м³/с.

Решение

Определим необходимую расходную характеристику

$$K_n = \frac{Q}{\sqrt{i}} = \frac{1,4}{\sqrt{0,001}} = 44,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Решение задачи проведем в табличной форме по примеру таблицы 1.3.

При глубине $h_1 = 0$ $\omega_1 = 0$, $\chi_1 = 0$, $R_1 = 0$, $C_1 = 0$ и $K_1 = 0$.

Пусть $h_2 = 1,0$ м. Тогда:

$$\omega_2 = (b + mh_2)h_2 = (1,0 + 2,5 \cdot 1,0) \cdot 1,0 = 3,5 \text{ м}^2;$$

$$\chi_2 = b + 2h_2\sqrt{m^2 + 1} = 1,0 + 2 \cdot 1,0\sqrt{2,5^2 + 1} = 6,38 \text{ м};$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{3,5}{6,38} = 0,55 \text{ м};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,025} 0,55^{\frac{1}{6}} = 32,8 \text{ м}^{0,5}/\text{с},$$

где n – коэффициент шероховатости канала (см. таблицу 1.2), $n = 0,025$.

Тогда

$$K_2 = \omega_2 C_2 \sqrt{R_2} = 3,5 \cdot 32,8 \sqrt{0,55} = 85,1 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее задаемся $h_3 = 0,5$ м и результаты остальных расчетов сводим в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Результаты расчета глубины канала

h , м	ω , м ²	χ , м	R , м	C , м ^{0,5} /с	K , м ³ /с
0	0	0	0	0	0
1,0	3,5	6,38	0,55	32,8	85,1
0,5	1,125	3,69	0,3	26,9	16,5

По результатам расчетов строим график (рисунок 1.2).

При $K_n = 44,3$ м³/с находим $h_n = 0,8$ м.

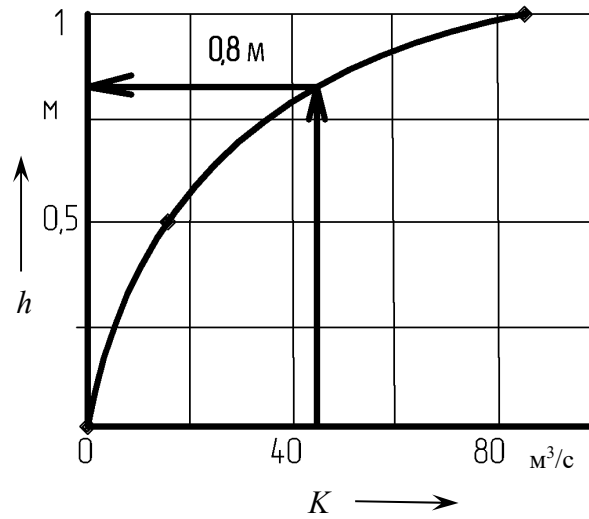


Рисунок 1.2 – График определения глубины потока в канале

На основании данных таблицы 1.5 определить глубину наполнения канала.

Таблица 1.5 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	Расход Q , м ³ /с	Уклон дна i , ‰	Ширина по дну b , м	Заложение откосов m	Коэффициент шероховатости n
1	0,8	0,8	0,4	1,5	0,025
2	0,6	1,0	0,6	1,5	0,030
3	1,0	1,0	0,5	1,5	0,0225
4	1,2	1,2	0,8	1,5	0,025
5	1,4	1,2	0,8	1,0	0,030
6	1,5	1,1	0,6	1,0	0,0225
7	1,3	1,1	0,8	1,0	0,035
8	1,1	1,3	1,0	1,0	0,025
9	0,9	1,3	1,1	1,75	0,030
10	0,7	1,4	1,2	1,75	0,0225
11	1,3	1,4	1,1	1,75	0,025
12	0,8	1,5	0,6	1,75	0,030
13	1,6	1,5	1,4	2,0	0,0225
14	1,0	1,2	1,0	2,0	0,035
15	1,7	1,6	1,4	2,0	0,025
16	1,2	1,3	1,0	2,0	0,030
17	1,4	1,4	1,2	1,25	0,0225
18	0,8	0,9	0,6	1,25	0,035
19	0,6	0,7	0,4	1,25	0,025
20	1,3	1,3	1,2	1,25	0,030

Контрольные вопросы

- 1 Физический смысл расходной характеристики.
- 2 От чего зависит коэффициент заложения откосов?
- 3 Размерность расходной характеристики.
- 4 От чего зависит расход воды в канале?
- 5 Назовите основные формы сечения каналов.
- 6 Размерность коэффициента Шези.
- 7 От чего зависит коэффициент шероховатости канала?

2 Критическая глубина и критический уклон. Бурное и спокойное состояние потока

При критической глубине h_k поток обладает минимальной энергией. Уклон дна русла, при котором устанавливается критическая глубина, называется критическим i_k [5, с. 154].

Минимум энергии потока определяется уравнением

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}, \quad (2.1)$$

где ω_k – площадь живого сечения потока при критической глубине, m^2 ;

B_k – ширина потока по верху, m ; $B_k = b + 2mh$;

α – коэффициент Кориолиса, $\alpha = 1,0 \dots 1,1$;

Q – величина расхода, m^3/c ;

g – ускорение силы тяжести, $g = 9,8 m/c^2$.

Для потоков трапециевидального живого сечения критическую глубину обычно определяют графическим способом. Для этого, задаваясь рядом значений глубин h , находят ω , B , а затем ω^3/B . Расчет удобнее производить в табличной форме. По результатам таблицы строим график $\omega^3/B = f(h)$ (рисунок 2.1).

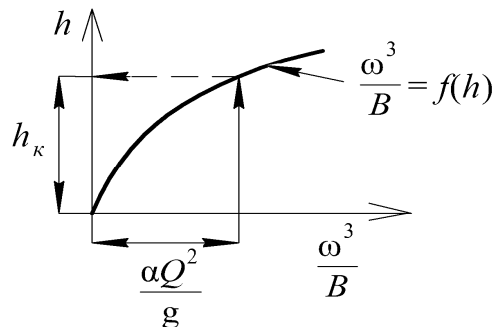


Рисунок 2.1 – Схема определение критической глубины

На графике вдоль оси ω^3/B откладываем значение $(\alpha Q^2)/g$ и по кривой находим h_k .

Для прямоугольного русла критическая глубина находится по формуле

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}. \quad (2.2)$$

По критической глубине потока определяется его состояние. Если глубина потока больше критической – спокойное состояние потока ($h > h_k$); если меньше – бурное ($h < h_k$). Это также можно определять по безразмерному критерию – числу Фруда:

$$Fr = \frac{v^2}{gh}. \quad (2.3)$$

Физический смысл числа Фруда: отношение удельных энергий – кинетической к потенциальной. При критической глубине $Fr = 1,0$.

Для бурного потока (преобладает кинетическая энергия) $Fr > 1,0$, для спокойного (преобладает потенциальная энергия) – $Fr < 1,0$.

Задача. Определить бурное или спокойное состояние потока в канале прямоугольного сечения, если величина расхода $Q = 12,0$ м³/с, его ширина $b = 4$ м, а глубина наполнения $h = 1,5$ м.

Решение

Используя зависимость (2.2), находим критическую глубину

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 12^2}{9,8 \cdot 4^2}} = 1 \text{ м.}$$

Так как $h = 1,5$ м $>$ $h_k = 1$ м, поток находится в спокойном состоянии.

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для самостоятельного решения

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Q , м ³ /с	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
b , м	0,4	0,6	0,8	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	0,8	1,0	1,2	1,4	1,0	1,2
h , м	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Используя таблицу 2.1, определить состояние потока (Fr или h_k). Русло прямоугольное.

Контрольные вопросы

- 1 Физический смысл числа Фруда.
- 2 Размерность числа Фруда.
- 3 Понятие критического уклона.
- 4 Значение числа Фруда при критической глубине.
- 5 Состояние потока при $h < h_k$.

3 Гидравлический прыжок

Гидравлическим прыжком (рисунок 3.1) называется уникальное явление резкого перехода потока из бурного состояния ($h_1 < h_k$) в спокойное ($h_2 > h_k$) [5, с. 171].

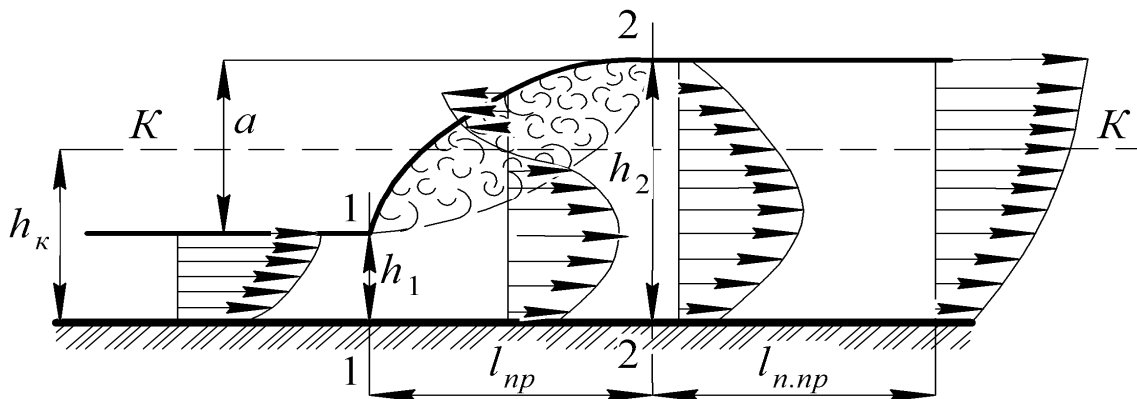


Рисунок 3.1 – Схема совершенного гидравлического прыжка

Глубины h_1 и h_2 носят название сопряженных глубин. Разность сопряженных глубин представляет собой высоту прыжка ($a = h_2 - h_1$). Длина горизонтальной проекции вальца прыжка на дно русла – длина прыжка l_{np} .

Длина послепрыжкового участка $l_{n,np}$ – это расстояние, на протяжении которого эпюра скорости принимает вид, характерный для равномерного движения.

Для прямоугольного сечения канала сопряженные глубины связаны аналитическими зависимостями:

$$h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_2} \right)^3} - 1 \right] \quad (3.1)$$

или

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right]. \quad (3.2)$$

В прямоугольном канале длина прыжка

$$l_{np} = 5(h_2 - h_1) = 5a.$$

Длина послепрыжкового участка $l_{n,np} = (2,5 \dots 3) l_{np} = (12,5 \dots 15)a$.

Прыжок считается совершенным, если $h_2/h_1 > 2$.

Потери удельной энергии (напора) в гидравлическом прыжке прямоугольного живого сечения определяются как:

$$h_n = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_1 \cdot h_2}. \quad (3.3)$$

Характеристики гидравлического прыжка в каналах трапециевидального сечения можно найти в [2].

Задача. В прямоугольном русле первая сопряженная совершенного гидравлического прыжка $h_1 = 1,0$ м. Определить значение второй сопряженной h_2 , если критическая глубина $h_k = 2,0$ м.

Решение

Для решения задачи воспользуемся зависимостью (3.2):

$$h_2 = \frac{1,0}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot \left(\frac{2,0}{1,0} \right)^3} - 1 \right] = 4,53 \text{ м.}$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	Расход Q , м ³ /с	Ширина канала b , м	Первая сопряженная глубина h_1 , м
1	1,2	1,6	0,2
2	1,4	1,4	0,2
3	1,6	1,8	0,3
4	1,8	2,0	0,3
5	1,9	2,1	0,3
6	2,0	2,2	0,2
7	2,1	2,4	0,2
8	2,0	2,0	0,2
9	2,1	2,2	0,4
10	1,9	2,1	0,4
11	1,8	2,0	0,4
12	1,7	1,9	0,2

Окончание таблицы 3.1

Вариант	Расход Q , м ³ /с	Ширина канала b , м	Первая сопряженная глубина h_1 , м
13	1,6	1,8	0,2
14	1,5	1,7	0,2
15	1,4	1,6	0,3
16	1,3	1,5	0,3
17	1,2	1,4	0,3
18	1,1	1,3	0,2
19	1,0	1,2	0,2
20	0,9	1,0	0,2

Используя данные таблицы 3.1, определить вид гидравлического прыжка. Русло прямоугольное.

Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение гидравлического прыжка.
- 2 Что такое прыжковая функция?
- 3 Назовите основные параметры гидравлического прыжка.
- 4 Виды гидравлического прыжка.
- 5 Сопряженные глубины совершенного гидравлического прыжка.
- 6 Послепрыжковый участок.

4 Уравнение Бахметева

Для расчета кривых свободной поверхности потоков при неравномерном движении воды в каналах используется уравнение Б. А. Бахметева [5, с. 166]:

$$\frac{i \cdot l}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) \{ \varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1) \}, \quad (4.1)$$

где l – расстояние между поперечными сечениями потока 1–1 и 2–2, $l = l_2 - l_1$;
 h_2 и h_1 – глубины в сечениях 2–2 и 1–1 соответственно, $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$, $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$;

η_2 , η_1 – относительные глубины в сечениях 2–2 и 1–1 соответственно;
 h_0 – глубина потока при равномерном движении (нормальная глубина).

Гидравлический параметр русла \bar{j} может быть определен по формуле

$$\bar{j} = 0,5(j_1 + j_2), \quad (4.2)$$

каждое значение j_1 и j_2 – по формуле

$$j = \frac{\alpha i C^2 B}{g \chi}. \quad (4.3)$$

По аналогичной формуле находится среднее значение:

$$\bar{j} = \frac{\alpha i \bar{C}^2 \bar{B}}{g \bar{\chi}}, \quad (4.4)$$

где $\bar{B} = \frac{B_1 + B_2}{2}$; \bar{C} и $\bar{\chi}$ вычисляются по средней глубине $\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2}$.

Гидравлический показатель русла определяется согласно формуле

$$x = \frac{2 \lg\left(\frac{K_2}{K_1}\right)}{\lg\left(\frac{h_2}{h_1}\right)}. \quad (4.5)$$

Значения $\varphi(\eta)$, входящие в уравнение (4.1), вычислены путем разложения подынтегральной функции в ряд для различных значений η и x . Результаты вычислений представлены в таблице А.1.

Задача. Определить гидравлический показатель русла, если при $h_0 = 1,2$ м, $K_0 = 474$ м³/с, а при $h = 1,4$ м расходная характеристика $K = 682$ м³/с.

Решение

Воспользуемся зависимостью (4.3):

$$x = \frac{2 \lg\left(\frac{474}{682}\right)}{\lg\left(\frac{1,2}{1,4}\right)} = \frac{2 \cdot (-0,16)}{-0,07} = 4,57.$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 4.1. Необходимо определить гидравлический параметр русла j .

Ширину потока по верху вычисляем по формуле

$$B = b + 2mh.$$

Смоченный периметр $\chi = b + 2h\sqrt{m^2 + 1}$.

$$\text{Коэффициент Шези } C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}.$$

Таблица 4.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	i , ‰	b , м	m	h , м
1	0,5	0,4	0,5	1,0
2	0,6	0,6	0,5	1,0
3	0,7	0,8	0,75	0,8
4	0,8	1,0	0,75	0,8
5	0,9	1,2	1,0	1,2
6	1,0	1,2	1,0	1,2
7	1,1	1,0	1,5	1,4
8	1,2	1,0	1,5	1,4
9	1,3	0,8	2,0	1,6
10	1,4	0,8	2,0	1,6
11	1,5	0,6	1,5	1,4
12	1,6	0,6	1,5	1,4
13	1,7	0,4	1,0	1,2
14	1,8	0,4	1,0	1,2
15	1,9	0,6	0,75	1,0
16	2,0	0,6	0,75	1,0
17	2,1	0,8	0,75	0,8
18	2,2	0,8	0,5	0,8
19	2,3	1,0	0,5	1,2
20	2,4	1,0	0,0	1,2

Контрольные вопросы

- 1 Способы построения кривых свободной поверхности по Б. А. Бахметеву.
- 2 Основная квалификация кривых свободной поверхности при неравномерном движении воды в каналах.
- 3 Общее число кривых свободной поверхности воды в каналах при $i < i_k$; $i = i_k$; $i > i_k$; $i = 0$; $i < 0$.
- 4 От чего зависит гидравлический показатель русла?
- 5 Как определяются η_1 и η_2 ?

5 Водосливы

Водослив – искусственное безнапорное сооружение в канале, через которое протекает жидкость [5, с. 176]. Основной классификацией водосливов является соотношение между напором на водосливе H и толщиной водослива или водосливной стенки δ . По этой классификации они бывают:

- водослив с тонкой стенкой $\delta/H \leq 0,67$;
- водослив практического профиля $0,67 < \delta/H < 2,5$;
- водослив с широким порогом $2,5 < \delta/H < 10$.

При гидравлическом расчете водосливов главной задачей является определение их пропускной способности Q , которую можно найти по основной формуле водосливов:

$$Q = mb\sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}}, \quad (5.1)$$

где m – коэффициент расхода водослива; зависит от типа водослива и учитывает сопротивление протеканию жидкости через водослив.

Для водослива с тонкой стенкой его величина колеблется в пределах $m = 0,42 \dots 0,44$; для водосливов практического профиля $m = 0,42 \dots 0,57$ и для водосливов с широким порогом $m = 0,31 \dots 0,35$. Водопропускные трубы малых мостов рассчитываются как водосливы с широким порогом. Для безголовочных труб $m = 0,31$. При обтекаемых оголовках с коническим входным оголовком коэффициент расхода может достигать $m = 0,35$.

Задача. Определить ширину b водослива с широким порогом для пропуска расхода $Q = 3 \text{ м}^3/\text{с}$ при напоре с учетом скорости подхода потока $H_0 = 1,5 \text{ м}$.

Решение

Воспользуемся формулой (5.1).

Решая относительно ширины водослива, получим

$$b = \frac{Q}{m\sqrt{2gH_0^{\frac{3}{2}}}} = \frac{3}{0,31\sqrt{2 \cdot 9,8(1,5)^{\frac{3}{2}}}} = 1,2 \text{ м.}$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 5.1. Используя данные таблицы 5.1, определить ширину водослива b .

Таблица 5.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
m	0,3	0,3	0,31	0,31	0,3	0,31	0,3	0,3	0,31	0,31	0,3	0,31	0,3	0,3	0,31
$H_0, \text{ м}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1,0

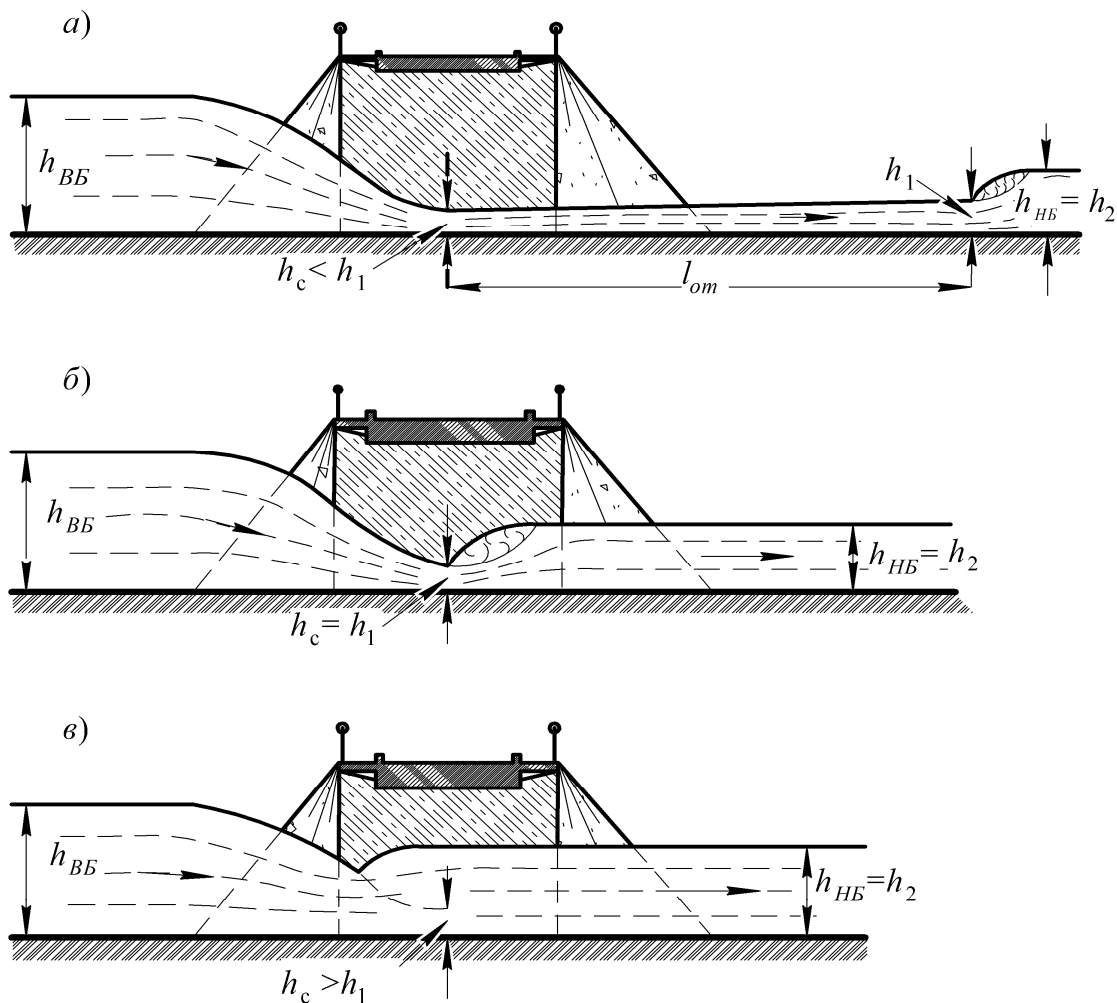
Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение водослива.
- 2 Назовите основные виды водослива.
- 3 От чего зависит коэффициент расхода водослива?
- 4 К какому виду водосливов относятся водопропускные трубы?
- 5 Какой водослив считается подтопленным?

6 Сопряжение бьефов

Сопряжение бьефов представляет собой соединение потока, поступающего из верхнего бьефа, с потоком нижнего бьефа [5, с. 181]. Сопряжение бьефов может происходить:

- по типу отогнанного прыжка (рисунок 6.1, а);
- с надвинутым прыжком (рисунок 6.1, б);
- по типу затопленного гидравлического прыжка (рисунок 6.1, в).



а – с отогнанным прыжком; б – с надвинутым прыжком; в – с затопленным прыжком

Рисунок 6.1 – Типы сопряжения бьефов

Тип сопряжения зависит от глубины потока в нижнем бьефе, которая принимается равной второй сопряженной глубине гидравлического прыжка, и глубины потока в сжатом сечении. Если глубина потока в сжатом сечении h_c меньше первой сопряженной глубины гидравлического прыжка ($h_c < h_1$), то сопряжение будет происходить в виде отогнанного прыжка. Если глубина потока в сжатом сечении будет равна первой сопряженной глубине гидравлического прыжка ($h_c = h_1$), то сопряжение будет происходить в виде надвинутого гидравлического прыжка. Если же глубина потока в сжатом сечении будет больше первой сопряженной глубины гидравлического прыжка ($h_c > h_1$), то сопряжение будет происходить по типу затопленного прыжка. Более безопасным видом сопряжения для устойчивости русла нижнего бьефа будет сопряжение по типу затопленного прыжка.

Для определения типа сопряжения необходимо знать глубину нижнего бьефа. Ее величина может быть рассчитана как для равномерного движения [5, с. 142]. Глубина потока в сжатом сечении может быть рассчитана на основании уравнения Бернулли. Формула для определения h_c имеет вид:

$$h_c = \frac{Q}{\varphi b \sqrt{2g(E - h_c)}} \quad (6.1)$$

где φ – коэффициент скорости, $\varphi = 0,85 \dots 0,95$;

E – полная удельная энергия на подходе к сооружению, м;

$$E = h_{BB} + \frac{\alpha v_{BB}^2}{2g} \quad (6.2)$$

Это уравнение решается методом последовательных приближений. Сначала принимаем, что в правой части уравнения в знаменателе $h_c = 0$. Вычислив после этого значение h_c , подставим его в знаменатель уравнения (6.1), найдем уточненное значение h_c . Процесс приближения проводится до тех пор, пока новое значение глубины потока в сжатом сечении не будет отличаться от предыдущего на 2...3 %.

Задача. Глубина потока в прямоугольном русле нижнего бьефа $h_{НБ} = 2$ м, напор с учетом скорости подхода к сооружению $E = 6$ м. Расход $Q = 8$ м³/с, ширина водопропускного сооружения $b = 10$ м. Определить вид сопряжения бьефов. Коэффициент скорости $\varphi = 0,9$.

Решение

Найдем критическую глубину

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 8^2}{9,8 \cdot 10^2}} = 0,42 \text{ м.}$$

Определим первую сопряженную гидравлического прыжка при $h_2 = h_{НБ}$:

$$h_1 = \frac{h_{НБ}}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_{НБ}} \right)^3} - 1 \right] \cdot \frac{2}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot \left(\frac{0,42}{2} \right)^3} - 1 \right] = 0,04 \text{ м.}$$

Найдем глубину потока в сжатом сечении:

$$h_c = \frac{Q}{\varphi b \sqrt{2g(E - h_c)}} = \frac{8}{0,9 \cdot 10 \sqrt{2 \cdot 9,8(6 - 0,0)}} = 0,08 \text{ м.}$$

Уточняем значение h_c , подставляя найденное значение $h_c = 0,08$ м,

$$h_c = \frac{8}{0,9 \cdot 10 \sqrt{2 \cdot 9,8(6 - 0,08)}} = 0,08 \text{ м.}$$

Так как $h_c = 0,08$ м $>$ $h_1 = 0,04$ м, сопряжение бьефов будет происходить с затопленным прыжком.

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 6.1. Определить вид сопряжения бьефов, считать русло нижнего бьефа прямоугольным.

Таблица 6.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	Q , м ³ /с	E , м	φ	$h_{НЮ}$	b , м
1	1,2	2	0,9	1,2	2
2	1,4	2,5	0,9	1,0	2
3	1,6	3	0,9	1,4	2,2
4	1,8	3,5	0,8	1,2	2,2
5	1,9	4	0,8	1,4	2,4
6	2,0	4,5	0,8	1,6	2,4
7	2,1	4,2	0,9	1,6	3
8	2,0	4,2	0,9	1,8	3
9	2,1	4,0	0,9	1,8	2,8
10	1,9	3,5	0,8	1,6	2,6
11	1,8	3	0,8	1,7	2,4
12	1,7	2,5	0,8	1,1	2,6
13	1,6	2,2	0,9	1,0	2,6
14	1,5	2,0	0,9	1,2	2,4

Окончание таблицы 6.1

Вариант	Q , м ³ /с	E , м	φ	$h_{ню}$	v , м
15	1,4	2,2	0,9	1,1	2,4
16	1,3	2,0	0,8	1,0	2,2
17	1,2	1,8	0,8	0,8	2,2
18	1,1	1,6	0,8	0,8	2
19	1,0	1,6	0,9	0,9	2
20	0,9	1,4	0,9	0,6	2

Контрольные вопросы

- 1 Назовите типы сопряжения бьефов.
- 2 Как определяется глубина нижнего бьефа?
- 3 От чего зависит глубина потока в сжатом сечении?
- 4 Какой тип сопряжения бьефов наиболее безопасный?
- 5 От чего зависит тип сопряжения бьефов?

7 Сооружения для гашения энергии потока

В случае сопряжения бьефов с отогнанным прыжком для получения сопряжения с затопленным прыжком проектируются водобойные колодцы, водобойные стенки или комбинированные водобойные колодцы [5, с. 185].

Водобойный колодец (рисунок 7.1) представляет собой искусственное увеличение глубины нижнего бьефа за счет понижения русла на начальном участке нижнего бьефа для получения затопленного гидравлического прыжка. Гидравлический расчет состоит в определении глубины колодца d_k и его длины l_k . Глубину колодца можно найти из условия получения глубины воды в колодце, равной второй сопряженной h_2 с запасом:

$$d_{кл} = \sigma h_2 - h_{нб} - \Delta z, \quad (7.1)$$

где σ – коэффициент запаса, $\sigma = 1,05 \dots 1,1$;

Δz – величина перепада; является напором для подтопленного водослива с широким порогом:

$$\Delta z = \frac{\alpha v_{нб}^2}{2g\varphi^2} - \frac{\alpha v_{кл}^2}{2g}; \quad (7.2)$$

$v_{кл}, v_{нб}$ – средние скорости потока в водобойном колодце и нижнем бьефе соответственно, м/с.

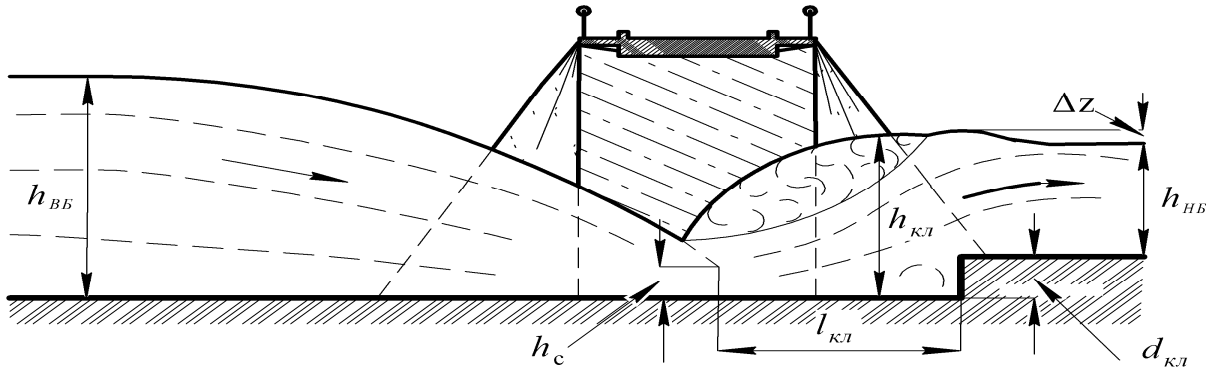


Рисунок 7.1 – Схема водобойного колодца

Длина колодца принимается меньше длины свободного прыжка l_{np} (в данном случае прыжок подпертый): $l_k = (0,7 \dots 0,9) l_{np}$.

Водобойная стенка представляет собой преграду в русле нижнего бьефа в виде водослива практического профиля (рисунок 7.2).

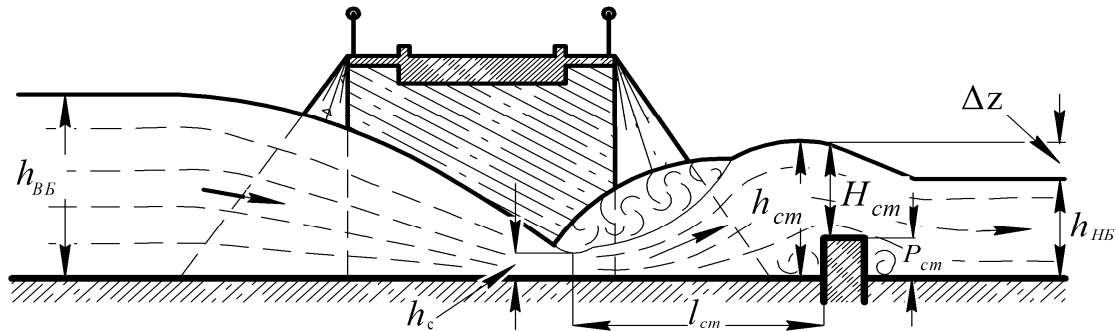


Рисунок 7.2 – Схема водобойной стенки

Высота водобойной стенки

$$P_{см} = \sigma h_2 - H_{см}, \quad (7.3)$$

где $H_{см}$ — напор на водобойной стенке,

$$H_{см} = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{\alpha v_{см}^2}{2g}; \quad (7.4)$$

Q — расход потока, поступающего в нижний бьеф, m^3/s ;

m — коэффициент расхода водослива практического профиля, $m \approx 0,40$;

b — длина водобойной стенки (ширина русла нижнего бьефа), м;

$v_{см}$ — средняя скорость потока на подходе к водобойной стенке, м/с;

$$v_{см} = \frac{Q}{bh_{см}}.$$

Расстояние до водобойной стенки $l_{см} = (0,7 \dots 0,9) l_{np}$.

Комбинированный водобойный колодец представляет собой сочетание уступа водобойного колодца и водобойной стенки. Для решения задачи исходным уравнением является:

$$\sigma h_2 = d_k + P_{cm} + H_{cm}. \quad (7.5)$$

В данном случае два неизвестных d_k и P_{cm} , одним из них необходимо задаться. Длина колодца такая же, как для водобойных колодца и стенки.

Задача. Определить высоту водобойной стенки P_{cm} , если первая сопряженная глубина гидравлического прыжка $h_1 = 0,4$ м ($h_k = 0,8$ м), а напор перед стенкой $H_{cm} = 0,7$ м. Коэффициент расхода водослива $m = 0,34$.

Решение

Найдем вторую сопряженную глубину

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right] = \frac{0,4}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \cdot \left(\frac{0,8}{0,4} \right)^3} - 1 \right] = 1,4 \text{ м.}$$

Воспользуемся уравнением (7.3):

$$P_{cm} = \sigma h_2 - H_{cm} = 1,05 \cdot 1,4 - 0,7 = 0,77 \text{ м.}$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 7.1. Определить глубину водобойного колодца или высоту водобойной стенки. При необходимости рассчитать комбинированный водобойный колодец.

Таблица 7.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	h_1 , м	h_k , м	σ	$h_{нБ}$, м
1	0,4	0,6	1,1	0,7
2	0,6	0,8	1,1	0,9
3	0,8	1,2	1,05	1,1
4	0,9	1,5	1,05	1,2
5	1,1	1,5	1,1	1,4
6	1,2	1,6	1,1	1,5
7	1,0	1,4	1,05	1,4
8	0,7	1,3	1,05	0,9

Окончание таблицы 7.1

Вариант	h_1 , м	h_k , м	σ	$h_{нб}$, м
9	0,5	1,3	1,1	0,8
10	0,3	1,2	1,1	0,7
11	0,4	1,3	1,05	0,8
12	0,6	1,3	1,05	0,9
13	0,8	1,4	1,1	1,0
14	0,9	1,4	1,1	1,1
15	1,1	1,5	1,05	1,4
16	1,2	1,6	1,05	1,5
17	1,3	1,6	1,1	1,6
18	1,1	1,4	1,1	1,5
19	1,2	1,5	1,05	1,5
20	1,3	0,5	1,05	1,7

Контрольные вопросы

- 1 Когда устраивается водобойный колодец?
- 2 Достоинство водобойной стенки в сравнении с водобойным колодцем.
- 3 От чего зависит высота водобойной стенки?
- 4 Что представляет собой комбинированный водобойный колодец?
- 5 От чего зависит глубина потока в сжатом сечении сооружения?

8 Перепады и быстротоки

Перепадами (рисунок 8.1) называются водопропускные сооружения, сопрягающие участки потока разных уровней ступенями. Перепады по конструкции могут быть одноступенчатыми и многоступенчатыми, колодезного и бесколодезного типов.

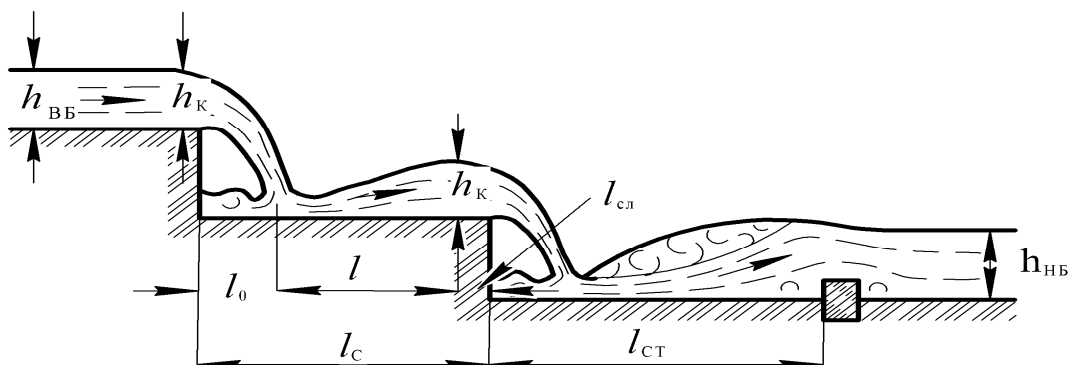


Рисунок 8.1 – Многоступенчатый перепад

Гидравлический расчет сводится к расчету входной части, промежуточной ступени и выходной части. Входная часть рассчитывается как водослив с широким порогом (5.1) и определяется его ширина b .

Длина промежуточной ступени

$$l_c = l_0 + l + l_{сл}, \quad (8.1)$$

где l_0 – дальность отлета струи, м;

l – длина кривой подпора, м;

$l_{сл}$ – длина участка слива, м; $l_{сл} = (2,0 \dots 2,5) h_k$.

Дальность отлета струи

$$l_0 = P + h_k. \quad (8.2)$$

Длина кривой подпора рассчитывается по способу Бахметева или для широкого русла (по предложению В. Д. Журина):

$$l = \frac{1}{i_k} (0,75 \cdot h_k - h_{сж}). \quad (8.3)$$

Высотой ступени P , как правило, задаются.

Выходная часть рассчитывается как одноступенчатый перепад, расчет которого заключается в определении высоты водобойной стенки и расстояния до нее от конца последней ступени $l_{см}$. Высоту водобойной стенки можно найти традиционным путем по (7.3). Расстояние до стенки

$$l_{см} = l_0 + 0,9l_{np}. \quad (8.4)$$

Задача. Определить расстояние до водобойной стенки от последней ступени перепада, высота которой $P = 1,0$ м. Высота гидравлического прыжка $a = 0,9$ м, а критическая глубина $h_k = 1,0$ м.

Решение

Длина отлета струи

$$l_0 = P + h_k = 1,0 \text{ м} + 1,0 \text{ м} = 2,0 \text{ м}.$$

Тогда

$$l_{см} = l_0 + 0,9l_{np} = 2,0 + 4,05 = 6,05 \text{ м}.$$

Быстротоки (рисунок 8.2) представляют собой искусственные русла с уклоном больше критического ($i > i_k$), которые устраиваются для сопряжения участков потока, расположенных на разных уровнях.

Входная часть рассчитывается аналогично многоступенчатому перепаду (определяется ширина быстротока b). Расчет водоската сводится к построению кривой свободной поверхности по способу Бахметева (или какому-либо другому). При длинном быстротоке в конце его устанавливается нормальная глубина h_0 . По глубине в конце быстротока, как первой сопряженной гидравлического прыжка, рассчитываются высота водобойной стенки и расстояние до нее.

Задача. Определить ширину быстротока, если величина расхода $Q = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$, напор с учетом скорости подхода $H_0 = 0,4 \text{ м}$. Коэффициент расхода $m = 0,32$.

Решение

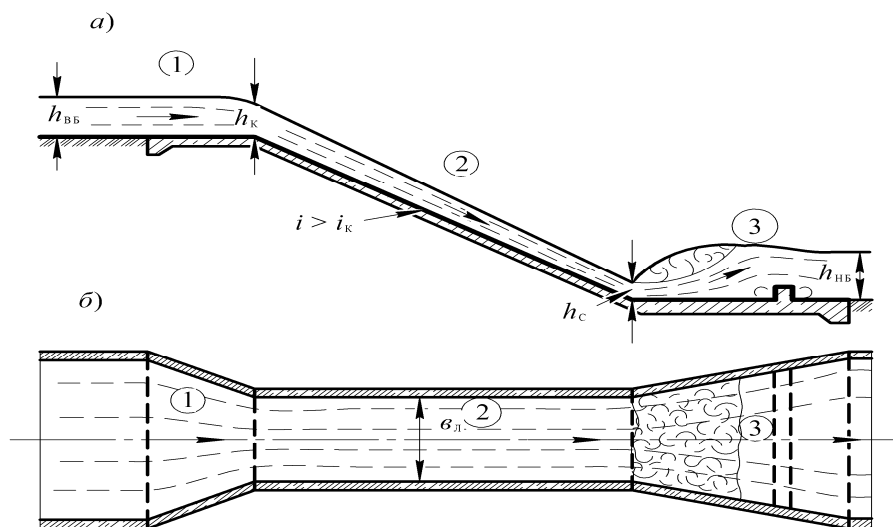
Ширина быстротока принимается одинаковой на всем его протяжении. Тогда ширина входа рассчитывается как водослив с широким порогом:

$$Q = mb\sqrt{2g} \cdot H_0^{\frac{3}{2}} .$$

Решим это уравнение относительно ширины b :

$$b = \frac{Q}{m\sqrt{2g}H_0^{\frac{3}{2}}} = \frac{0,5}{0,32\sqrt{2 \cdot 9,8}(0,4)^{\frac{3}{2}}} = 0,72 \text{ м} .$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 8.1. Определить длину промежуточной ступени перепада.



a – разрез по оси; b – план; 1 – входная часть; 2 – водоскат; 3 – выходная часть

Рисунок 8.2 – Схема быстротока

Таблица 8.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P , м	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	0,9	1,0
l , м	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5
h_k , м	0,5	0,6	0,7	0,8	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,6	0,5

Примечание – P – высота ступени; l – длина кривой подпора; h_k – критическая глубина

Контрольные вопросы

- 1 Перепад колодезного типа.
- 2 Когда устраивается перепад колодезного типа?
- 3 Когда наступает аэрация на быстротоке?
- 4 Какой быстроток считается длинным?
- 5 Возможные дефекты быстротоков.

9 Водоотвод с поверхности автомобильных дорог

Водоотвод с поверхности автомобильных дорог способствует безопасности и долговечности их эксплуатации [4, с. 137]. Он может быть организованный и неорганизованный. В зависимости от его конструкции различают открытый водоотвод, закрытый и комбинированный. При организованном водоотводе выпавшие осадки собираются с помощью специальных лотков или вдоль бордюрного камня к водоотводным сооружениям. При закрытом водоотводе она поступает в канализацию. Это имеет место в населенных пунктах, которые оборудованы канализацией. Вне населенных пунктов имеет место в основном открытый водоотвод. В данном случае вода от поверхности дороги отводится с помощью быстротоков или многоступенчатых перепадов. При комбинированном водоотводе дождевые осадки отводятся к основанию дороги посредством специального водовода. Этот водовод устраивается в теле насыпи дороги.

Движение воды вдоль бордюрного камня может быть описано с помощью уравнения

$$Q = 0,444n^{-1}i_l^{5/3}i_0^{1/2}B^{8/3}, \quad (9.1)$$

где Q – расход потока вдоль бордюрного камня, м³/с;

n – коэффициент шероховатости покрытия дороги;

i_l – продольный уклон дороги;

i_0 – поперечный уклон дороги;

B – ширина свободной поверхности потока (затопление края проезжей части дороги) (рисунок 9.1), м.

С помощью зависимости (9.1) можно определить величину подтопления B при известных продольном и поперечном уклонах проезжей части дороги. Или

наоборот, запроектировать величину продольного уклона i_l для безопасного подтопления проезжей части дороги B .

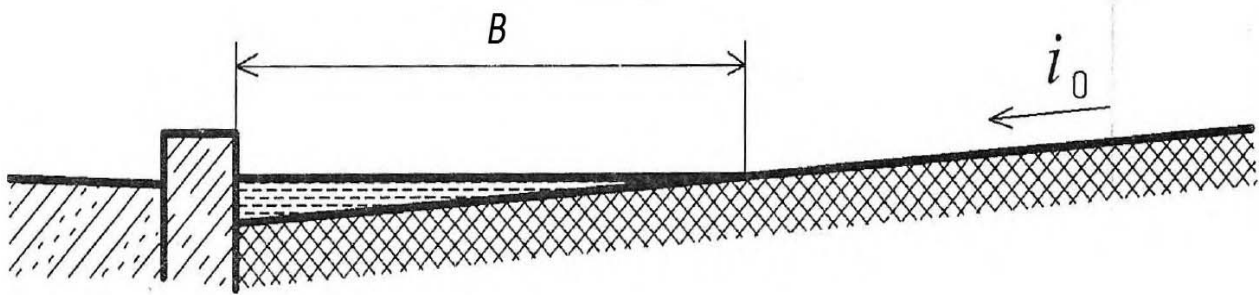


Рисунок 9.1 – Схема движения потока у бордюрного камня

Определение величины расчетного расхода для водоотводных сооружений рассматривается в курсе инженерной гидрологии по формуле предельной интенсивности [6]. Расчет водоотводных сооружений рассмотрен в разделе 8.

Задача. Определить ширину подтопления проезжей части автомобильной дороги B , если величина расчетного расхода $Q = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$, поперечный уклон дороги $i_0 = 20 \text{ ‰}$, продольный уклон составляет $i_l = 40 \text{ ‰}$. Коэффициент шероховатости поверхности дороги $n = 0,012$.

Решение

Уравнение (9.1) решаем относительно ширины подтопления B . Подставив значение исходных данных, получим:

$$B = \left(\frac{Qn}{0,444i_l^3i_0^2} \right)^{\frac{3}{8}} = \left(\frac{0,1 \cdot 0,012}{0,444 \cdot 0,04^3 \cdot 0,02^2} \right)^{\frac{3}{8}} = 1,7 \text{ м.}$$

Для закрепления знаний по теме необходимо решить одну из задач таблицы 9.1. Определить величину продольного уклона i_l .

Таблица 9.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	n	$B, \text{ м}$	$i_0, \text{ ‰}$
1	0,05	0,011	1,0	18
2	0,06	0,012	1,1	19
3	0,07	0,013	1,2	20
4	0,08	0,014	1,3	21
5	0,09	0,011	1,4	22

Окончание таблицы 9.1

Вариант	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	n	$B, \text{ м}$	$i_0, \text{ ‰}$
6	0,10	0,012	1,0	23
7	0,11	0,013	1,1	18
8	0,12	0,014	1,2	19
9	0,13	0,011	1,3	20
10	0,14	0,012	1,4	21
11	0,15	0,013	1,0	22
12	0,16	0,014	1,1	23
13	0,17	0,011	1,2	18
14	0,18	0,012	1,3	19
15	0,19	0,013	1,4	20
16	0,20	0,014	1,0	21
17	0,21	0,011	1,1	22
18	0,22	0,012	1,2	23
19	0,23	0,013	1,3	21
20	0,24	0,014	1,4	20

Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой закрытый водоотвод на автомобильных дорогах?
- 2 Где используется открытый водоотвод на автомобильных дорогах?
- 3 Назовите элементы открытого водоотвода.
- 4 Назовите элементы закрытого водоотвода.
- 5 Что представляет собой полузакрытый (комбинированный) водоотвод на автомобильных дорогах?

10 Водопрпускные трубы

Водопрпускные трубы являются наиболее распространенными инженерными сооружениями автомобильных дорог.

С гидравлической точки зрения водопрпускные трубы проектируются безнапорными и рассчитываются как водосливы с широким порогом [5, с. 309].

Условие безнапорного режима работы трубы

$$H < 1,2 D,$$

где H – напор перед трубой, м; $H = h_{ВБ}$.

D – диаметр трубы, м.

Главной задачей гидравлического расчета является определение ее диаметра. Из основного уравнения водосливов получим

$$D = \frac{Q}{m\sqrt{2gH^2}}^{\frac{3}{2}}. \quad (10.1)$$

Задача. Определить диаметр трубы для пропуска расхода $Q = 1,2 \text{ м}^3/\text{с}$. Труба должна работать в безнапорном режиме. Коэффициент расхода $m = 0,32$; скоростью подхода пренебречь.

Решение

Воспользуемся формулой (10.1):

$$D = \frac{1,2}{0,31\sqrt{2 \cdot 9,8(1,2D)^2}}^{\frac{3}{2}}.$$

Решая относительно D , получим

$$D^{\frac{5}{2}} = \frac{1,2}{0,31\sqrt{2 \cdot 9,8(1,2)^2}}^{\frac{3}{2}} = 0,67,$$

откуда $D = 0,3 \text{ м}$.

Принимаем $D = 0,4 \text{ м}$.

Используя данные таблицы 10.1, определить режим работы водопропускной трубы.

Таблица 10.1 – Исходные данные для самостоятельного решения задач

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9
$D, \text{ м}$	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4
m	0,31	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,31	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34

Контрольные вопросы

- 1 Составные элементы водопропускной трубы.
- 2 Назовите возможные режимы работы водопропускной трубы.

- 3 От чего зависит коэффициент расхода водопропускной трубы?
- 4 Назначение оголовков водопропускных труб.
- 5 Преимущество водопропускных труб перед малыми мостами.

Список литературы

- 1 **Богомолов, А. И.** Гидравлика: учебник / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – Москва: Стройиздат, 1972. – 648 с.
- 2 **Большакова, В. В.** Сборник задач по гидравлике, инженерной гидрологии и регулировании стока / В. В. Большакова, А. Н. Иванов. – Москва: Высшая школа, 1975. – 184 с.
- 3 **Железняков, Г. В.** Гидравлика и гидрология: учебник / Г. В. Железняков. – Москва: Транспорт, 1989. – 376 с.
- 4 **Константинов, Н. М.** Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебник в 2 ч. / Н. М. Константинов, Н. А. Петров, Л. И. Высоцкий. – Москва: Высшая школа, 1987. – 764 с.
- 5 **Парахневич, В. Т.** Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебное пособие / В. Т. Парахневич. – Москва: ИНФРА-М, 2015. – 368 с.
- 6 **Парахневич, В. Т.** Гидрология и гидрометрия водотоков: учебное пособие / В. Т. Парахневич. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2003. – 107 с.

Приложение А (обязательное)

Таблица А.1 – Значение функции $\varphi(\eta)$ для положительного уклона дна русла $i > 0$ при различных значениях η и x

η	x										
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,50	5,00	5,50	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,05	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	
0,10	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	
0,15	0,151	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	
0,20	0,202	0,201	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	
0,25	0,255	0,252	0,251	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	0,250	
0,30	0,309	0,304	0,302	0,301	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	
0,35	0,365	0,357	0,354	0,352	0,351	0,351	0,351	0,350	0,350	0,350	
0,40	0,423	0,411	0,407	0,404	0,403	0,403	0,402	0,401	0,400	0,400	
0,45	0,484	0,468	0,461	0,458	0,456	0,455	0,454	0,452	0,451	0,450	
0,50	0,549	0,527	0,517	0,513	0,510	0,508	0,507	0,504	0,502	0,501	
0,55	0,619	0,590	0,575	0,570	0,566	0,564	0,561	0,556	0,554	0,552	
0,60	0,693	0,657	0,637	0,630	0,624	0,621	0,617	0,610	0,607	0,605	
0,61	0,709	0,671	0,650	0,642	0,636	0,632	0,628	0,621	0,618	0,615	
0,62	0,725	0,685	0,663	0,654	0,648	0,644	0,640	0,632	0,629	0,626	
0,63	0,741	0,699	0,676	0,667	0,660	0,656	0,652	0,644	0,640	0,637	
0,64	0,758	0,714	0,689	0,680	0,673	0,668	0,664	0,656	0,651	0,648	
0,65	0,775	0,729	0,703	0,693	0,686	0,681	0,676	0,668	0,662	0,659	
0,66	0,792	0,744	0,717	0,706	0,699	0,694	0,688	0,680	0,674	0,670	
0,67	0,810	0,760	0,731	0,720	0,712	0,707	0,700	0,692	0,686	0,681	
0,68	0,829	0,776	0,746	0,734	0,725	0,720	0,713	0,704	0,698	0,692	
0,69	0,848	0,792	0,761	0,748	0,739	0,733	0,726	0,716	0,710	0,704	
0,70	0,867	0,809	0,776	0,763	0,753	0,746	0,739	0,728	0,722	0,716	

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,72	0,907	0,843	0,807	0,793	0,781	0,774	0,766	0,754	0,747	0,740
0,74	0,950	0,880	0,840	0,823	0,811	0,802	0,794	0,780	0,773	0,764
0,76	0,996	0,919	0,874	0,855	0,843	0,832	0,823	0,808	0,799	0,788
0,78	1,045	0,960	0,911	0,890	0,877	0,865	0,854	0,837	0,826	0,814
0,80	1,098	1,006	0,950	0,927	0,913	0,900	0,887	0,867	0,854	0,842
0,82	1,156	1,056	0,993	0,968	0,951	0,937	0,922	0,898	0,884	0,872
0,84	1,221	1,110	1,040	1,013	0,992	0,976	0,960	0,933	0,917	0,904
0,86	1,293	1,170	1,092	1,062	1,039	1,019	1,002	0,972	0,953	0,938
0,88	1,375	1,238	1,151	1,116	1,092	1,069	1,049	1,015	0,992	0,975
0,90	1,472	1,316	1,218	1,179	1,152	1,127	1,103	1,065	1,038	1,017
0,91	1,527	1,361	1,257	1,216	1,186	1,159	1,132	1,093	1,063	1,040
0,92	1,589	1,411	1,300	1,257	1,223	1,194	1,165	1,124	1,091	1,066
0,93	1,658	1,469	1,348	1,302	1,265	1,235	1,204	1,159	1,122	1,095
0,94	1,738	1,535	1,403	1,352	1,312	1,280	1,247	1,198	1,157	1,128
0,95	1,831	1,610	1,467	1,411	1,367	1,332	1,297	1,241	1,197	1,165
0,96	1,945	1,701	1,545	1,483	1,435	1,395	1,356	1,292	1,246	1,209
0,97	2,092	1,820	1,644	1,575	1,521	1,475	1,431	1,362	1,308	1,265
0,98	2,297	1,985	1,783	1,703	1,640	1,587	1,537	1,460	1,394	1,344
0,99	2,646	2,264	2,018	1,921	1,844	1,777	1,714	1,614	1,538	1,474
1,00	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
1,01	2,652	1,863	1,419	1,265	1,138	1,031	0,936	0,790	0,680	0,598
1,02	2,307	1,591	1,193	1,053	0,940	0,847	0,766	0,641	0,546	0,474
1,03	2,107	1,432	1,061	0,931	0,827	0,742	0,668	0,555	0,468	0,402
1,04	1,966	1,320	0,967	0,845	0,747	0,668	0,600	0,494	0,415	0,353
1,05	1,857	1,234	0,896	0,779	0,687	0,612	0,548	0,447	0,375	0,317
1,06	1,768	1,164	0,838	0,726	0,640	0,566	0,506	0,411	0,343	0,290
1,07	1,693	1,105	0,790	0,682	0,600	0,529	0,471	0,381	0,316	0,266
1,08	1,629	1,053	0,749	0,645	0,565	0,497	0,441	0,355	0,292	0,245

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,16	1,301	0,797	0,542	0,458	0,391	0,339	0,295	0,227	0,181	0,145
1,18	1,247	0,755	0,510	0,427	0,364	0,314	0,272	0,208	0,165	0,130
1,20	1,199	0,718	0,480	0,400	0,341	0,292	0,252	0,192	0,151	0,118
1,22	1,156	0,685	0,454	0,377	0,320	0,272	0,235	0,177	0,138	0,108
1,24	1,117	0,656	0,431	0,356	0,301	0,255	0,219	0,164	0,126	0,098
1,26	1,081	0,630	0,410	0,337	0,284	0,240	0,205	0,152	0,116	0,090
1,28	1,049	0,606	0,391	0,320	0,268	0,226	0,193	0,142	0,107	0,082
1,30	1,018	0,582	0,373	0,304	0,254	0,214	0,181	0,133	0,099	0,076
1,32	0,990	0,561	0,357	0,290	0,241	0,202	0,171	0,125	0,092	0,070
1,34	0,964	0,542	0,341	0,277	0,229	0,192	0,161	0,117	0,086	0,064
1,36	0,940	0,524	0,328	0,265	0,219	0,182	0,153	0,109	0,080	0,058
1,38	0,917	0,508	0,316	0,253	0,209	0,173	0,145	0,103	0,074	0,054
1,40	0,896	0,492	0,304	0,243	0,199	0,165	0,137	0,097	0,070	0,050
1,42	0,876	0,477	0,293	0,233	0,191	0,157	0,131	0,091	0,066	0,046
1,44	0,856	0,463	0,283	0,225	0,183	0,150	0,125	0,085	0,062	0,044
1,46	0,838	0,450	0,273	0,217	0,175	0,144	0,119	0,081	0,058	0,042
1,48	0,821	0,438	0,263	0,209	0,168	0,138	0,113	0,077	0,054	0,040
1,50	0,805	0,426	0,255	0,201	0,162	0,132	0,108	0,073	0,052	0,038
1,55	0,767	0,399	0,235	0,184	0,147	0,119	0,097	0,065	0,045	0,032
1,60	0,733	0,376	0,218	0,170	0,134	0,108	0,087	0,058	0,039	0,027
1,65	0,703	0,355	0,203	0,157	0,123	0,098	0,079	0,052	0,034	0,023
1,70	0,675	0,336	0,189	0,145	0,113	0,090	0,072	0,046	0,030	0,020
1,75	0,650	0,318	0,177	0,134	0,104	0,083	0,065	0,041	0,026	0,017
1,80	0,626	0,303	0,166	0,124	0,096	0,077	0,060	0,037	0,023	0,015
1,85	0,605	0,289	0,156	0,115	0,089	0,071	0,055	0,033	0,020	0,013
1,90	0,585	0,276	0,147	0,108	0,083	0,066	0,050	0,030	0,018	0,011
1,95	0,567	0,264	0,139	0,102	0,078	0,061	0,046	0,027	0,016	0,009
2,0	0,550	0,253	0,132	0,097	0,073	0,057	0,043	0,025	0,015	0,008
2,2	0,490	0,216	0,108	0,077	0,057	0,043	0,032	0,018	0,010	0,006

Окончание таблицы А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2,4	0,444	0,188	0,090	0,063	0,046	0,034	0,024	0,013	0,007	0,004
2,6	0,405	0,165	0,076	0,052	0,037	0,028	0,019	0,0095	0,0050	0,0025
2,8	0,374	0,146	0,065	0,044	0,030	0,022	0,015	0,0075	0,0040	0,0015
3,0	0,346	0,131	0,056	0,037	0,025	0,0165	0,0125	0,0060	0,0030	0,00075
3,5	0,294	0,104	0,041	0,026	0,017	0,0125	0,0075	0,0035	0,0020	0,00050
4,0	0,255	0,084	0,031	0,019	0,012	0,0085	0,0050	0,0020	0,0010	0,00025
4,5	0,226	0,070	0,025	0,014	0,009	0,0065	0,0035	0,0015	0,0005	0
5,0	0,203	0,059	0,020	0,010	0,007	0,0050	0,0025	0,0010	0	0
6,0	0,168	0,047	0,014	0,007	0,004	0,0030	0,0015	0,0003	0	0
8,0	0,126	0,029	0,009	0,004	0,002	0,0015	0,0010	0,0002	0	0
10,0	0,100	0,021	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0	0	0