

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Определение расчетных гидрологических характеристик

Учебно-методическое пособие

Красноярск
СФУ
2012

УДК 556.048 (07)

ББК 26.22я73

И 621

Рецензенты: И.Я. Богданов, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных дорог и городских сооружений СФУ
В.К. Витер, канд. техн. наук, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений СФУ

Составители: Татьяна Валентиновна Гавриленко
Юрий Евгеньевич Гавриш

И 621 Инженерная гидрология. Определение расчетных гидрологических характеристик: учебно-методическое пособие [Текст]: для студентов специальности 270205.65 – «Автомобильные дороги и аэродромы» / сост. Т.В. Гавриленко, Ю.Е. Гавриш. – Красноярск: Сиб.федер. ун-т, 2012. –

Излагается методика проведения лабораторных работ по определению основных гидрологических характеристик водных потоков, использующихся при проектировании и эксплуатации мостовых переходов.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 291000 (270205.65) – «Автомобильные дороги и аэродромы» направление подготовки 653600 (270200.65) – «Транспортное строительство».

УДК 556.048 (07)

ББК 26.22я73

© Сибирский федеральный университет, 2012

Учебное издание

Подписано в свет 31.01.2012 г. Заказ 6099.

Уч.– изд. л. 1,9, 0,8 Мб.

Тиражируется на машиночитаемых носителях.

Редакционно-издательский отдел
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел/факс (391) 2062149. E-mail rio@sfu-kras.ru
<http://rio.sfu.kras.ru>

ОГЛАВЛЕНИЕ

<u>Общие сведения</u>	<u>4</u>
<u>Лабораторная работа 1. Построение гидрографа и определение источников питания реки.....</u>	<u>5</u>
<u>Лабораторная работа 2. Построение графиков уровней воды, графиков связи бытовых уровней и расходов воды</u>	<u>9</u>
<u>Лабораторная работа 3. Построение кривой обеспеченности максимальных расходов воды при наличии многолетних данных гидрометрических наблю- дений.....</u>	<u>13</u>
<u>Лабораторная работа 4. Определение характеристик твердого стока реки.....</u>	<u>20</u>
<u>Лабораторная работа 5. Определение характеристик зимнего режима реки.....</u>	<u>24</u>
<u>Список использованных источников.....</u>	<u>26</u>
<u>Приложение А.....</u>	<u>27</u>
<u>Приложение Б.....</u>	<u>29</u>

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Автомобильные дороги, а также сооружения на них испытывают воздействие естественных водотоков, формируемых выпадающими на землю осадками. Для обеспечения безотказной работы проектируемых транспортных сооружений необходимо надежное *гидрологическое* обоснование принимаемых инженерных решений [1]. Гидрология – это обширная наука о режиме гидросферы земли. Специалисты дорожно-строительного профиля изучают раздел этой науки – *инженерную гидрологию*, а в нем те вопросы, которые относятся к *гидрологии суши*. В *гидрометрии* – другом разделе гидрологии – рассматриваются методы наблюдения и измерения гидрологических характеристик водных потоков [2,3].

Цель дисциплины «Инженерная гидрология» – ознакомление с основными законами и формами движения природных вод, изучение способов расчета гидрологических характеристик (расходов воды, наносов, ледовых явлений и т.д.), приобретение навыков их использования в методиках определения параметров отверстий мостов и деформаций подмостовых русл.

Задача лабораторных работ, выполняемых в рамках дисциплины «Инженерная гидрология», – помочь будущим инженерам приобрести навыки обработки результатов натурных измерений для определения расчетных характеристик водотоков и использования их в проектировании транспортных сооружений.

В процессе выполнения лабораторных работ необходимо научиться строить гидрографы, графики уровней воды, графики связи бытовых уровней и расходов, кривые обеспеченности максимальных расходов воды; оценивать источники питания реки; определять характеристики зимнего режима реки и параметры твердого стока реки. Графические материалы выполняются на миллиметровой бумаге формата А4 карандашом или черной тушью и вставляются в отчет по лабораторным работам.

В качестве исходных данных используются результаты наблюдений сети Среднесибирского межрегионального территориального управления Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Среднесибирское УГМС) [4]. В отчете приводится краткая характеристика водомерного поста, включающая: название реки и поста, номер и географические координаты поста, расстояние до устья реки, высоту нуля графика поста и размер площади водосбора, например:

Река – Тапса.

Станция – Кара-Хак.

Водомерный пост – № 49.

Географические координаты – 92° в. д. и 55° с. ш.

Расстояние от устья реки – 56 км.

Высота нуля графика поста – 675,87 м Балтийской системы.

Площадь водосборного бассейна – 567 км.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОГРАФА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ РЕКИ

Порядок выполнения работы

1 *Сбор данных.* Из таблицы «Ежедневные расходы воды» ежегодника выписывают значения среднедекадных расходов воды за весь год. Данные заносят в табл. 1.

2 *Построение гидрографа.* По данным табл. 1 строят *подекадный гидрограф* - график, представляющий собой изменение среднедекадных расходов в течение года (рис. 1). По нему производят анализ формы гидрографа и с учетом географического расположения исследуемого водотока на кривой выделяют характерные фазы водности (половодье, паводок, межень) и приближенно определяют их длительность.

3 *Определение объемов стока.* По среднедекадным значениям расхода рассчитывают подекадные объемы стока по формуле $W=QT$, м³, где T – период времени, измеряемый в *секундах*. Здесь следует помнить, что продолжительность третьей декады в каждом месяце своя. Ниже приведено количество секунд в характерных периодах времени:

1 сут. = 86400 с,	28 сут. = 2419200 с,
8 сут. = 691200 с,	29 сут. = 2505600 с,
10 сут. = 864000 с,	30 сут. = 2592000 с,
11 сут. = 950400 с,	31 сут. = 2678400 с.

Суммируя декадные объемы для каждого месяца, определяют месячный объем стока. Результаты расчета вносят в табл. 2. Последняя строка ΣV_m этой таблицы есть результат последовательного суммирования месячных объемов стока.

Таблица 1- Среднедекадные значения расходов воды, м³/с

Декада	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	2,29	2,73	0,9	0,51	6,1	19,1	17,3	19,7	21,5	9,42	5,4	2,29
II	3,29	1,62	0,51	1,24	13,14	9,27	16,2	30,1	14,6	8,25	4,58	2,1
III	3,0	1,58	0,51	2,74	21,1	9,19	24,7	16,6	11,3	5,97	2,55	2,84

Таблица 2 - Объем стока воды, тыс. м³

Объем стока		Месяц												
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
среднедекадный, V_d	декада	I	1979	2359	778	441	5270	16416	14947	17021	18576	8139	4666	1979
		II	2843	1400	441	1071	11353	8009	13997	25920	12614	7128	3957	1814
		III	2851	1229	485	2367	20053	7940	23475	15777	9763	5674	2203	2699
месячный, V_M			7672	4987	1703	3879	36677	32365	52419	58717	40954	20941	10826	6492
нарастающей суммой, ΣV_M			7672	12659	14362	18242	54918	87284	139703	198420	239374	260315	271140	277633

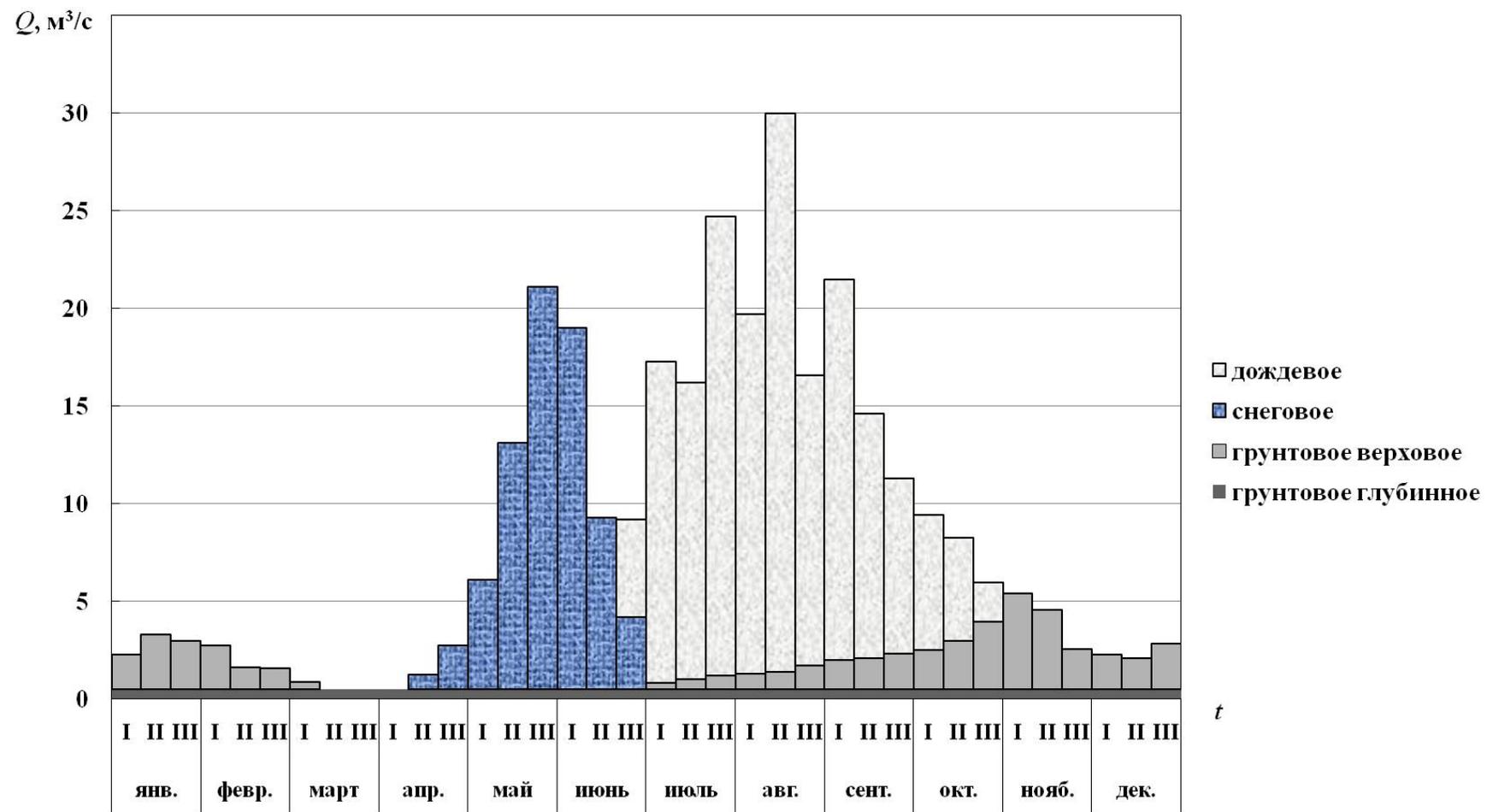


Рисунок 1 – Декадный гидрограф

4 *Построение интегральной кривой бытового стока.* Интегральная кривая представляет собой объем стока реки нарастающей суммой с первого до последнего дня года. График строится по значениям из последней строки табл. 2. Пример интегральной кривой бытового стока приведен на рис. 2.

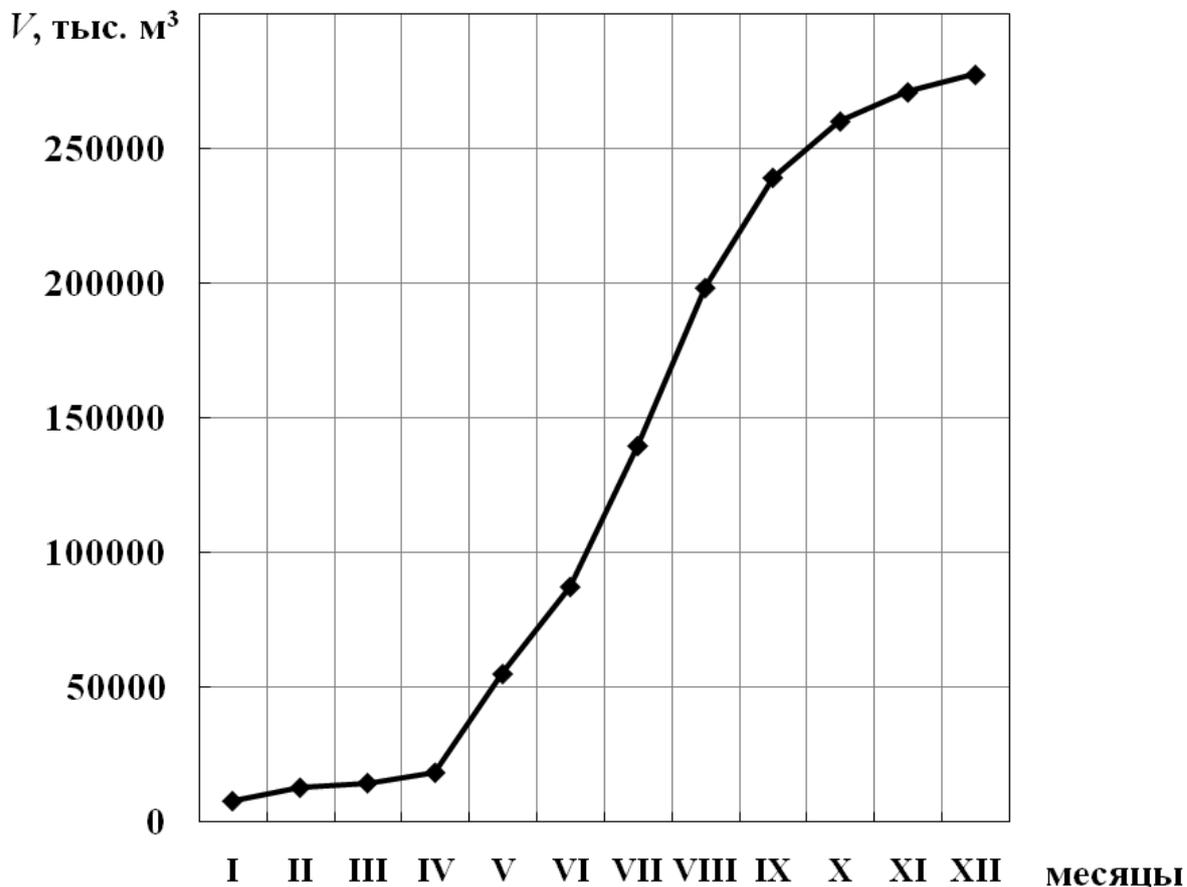


Рисунок 2 – Интегральная кривая бытового стока

5 *Выделение источников питания и доли каждого источника в общем объеме воды.* Непосредственно на площади гидрографа проводят разграничительные линии, приближенно характеризующие долю каждого из источников питания (верховое и глубинное грунтовое, снеговое, дождевое) в объеме стока воды в каждой из декад года.

6 *Вывод.* В конце работы делается вывод, в котором анализируется характер гидрографа: преобладающий тип питания реки, количество пиков паводка, вызванных снеговым и дождевым питанием, также указывается годовой объем стока воды.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ УРОВНЕЙ ВОДЫ, ГРАФИКОВ СВЯЗИ БЫТОВЫХ УРОВНЕЙ И РАСХОДОВ ВОДЫ

Порядок выполнения работы

1 *Сбор данных.* Из таблиц «Ежедневные расходы воды» и «Ежедневные уровни воды» ежегодника выписывают среднемесячные значения расходов и уровней воды, максимальное, минимальное и 10 промежуточных значений среднесуточных расходов и соответствующих им уровней с датами наблюдения для дней месяцев, не входящих в зимний период.

Среднемесячные значения расходов и уровней воды заносят в табл. 3, данные ежедневных наблюдений – в табл. 4.

Таблица 3 - Среднемесячные значения уровней H и расходов Q воды

Параметр	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$H, \text{ м}$	0,76	0,72	0,70	0,85	1,26	1,13	1,32	1,44	1,18	0,99	0,98	0,87
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	2,86	1,98	0,64	1,49	13,4	12,5	19,4	22,1	15,8	7,88	4,17	2,41

2 *Построение графиков изменения среднемесячных уровней и расходов воды.* По данным табл. 3 на отдельном листе миллиметровой бумаги строят график изменения среднемесячных уровней воды (*водомерный график*), а под ним – помесечный гидрограф (см. рис. 3 и 4).

Таблица 4 - Выборочные значения среднесуточных расходов Q и уровней H воды

№ п/п	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$H, \text{ м}$	Дата наблюдения
1	1,39	0,74	03.05
2	6,94	1,02	07.05
3	14,6	1,26	14.05
4	19,8	1,39	27.05
5	22,1	1,44	30.07
6	28,8	1,58	28.06
7	32,9	1,66	16.05
8	38,3	1,76	18.07
9	45,4	1,89	22.05
10	49,3	1,96	16.07
11	54,9	2,06	21.07
12	65,3	2,24	17.08

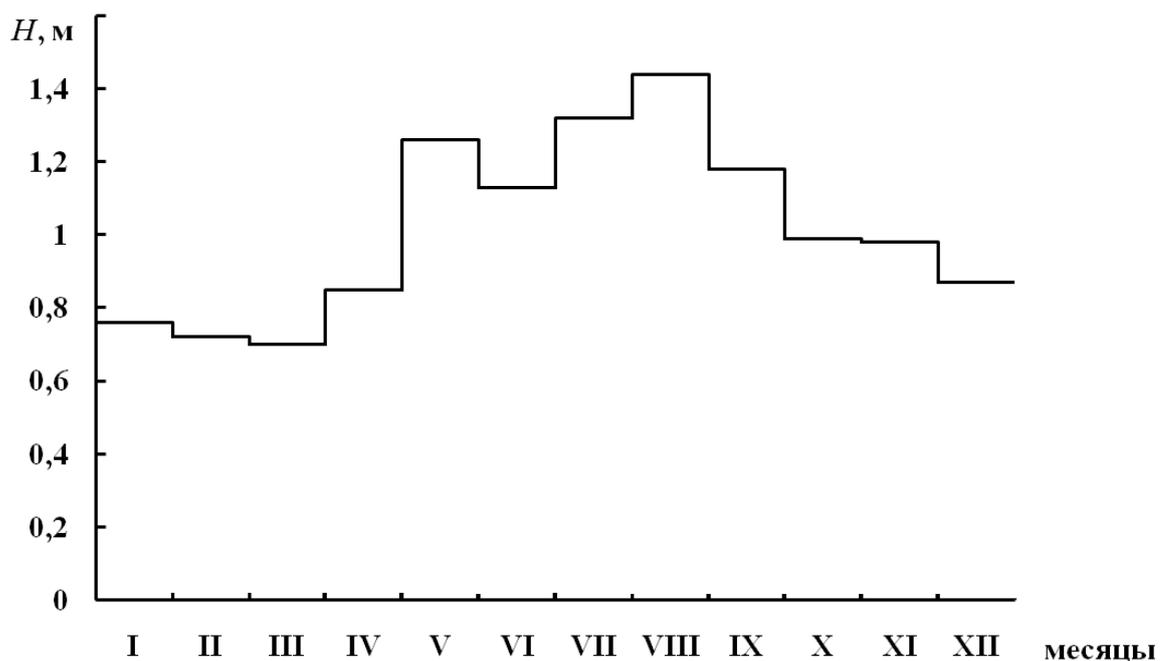


Рисунок 3 – Изменение среднемесячных уровней воды в течение года

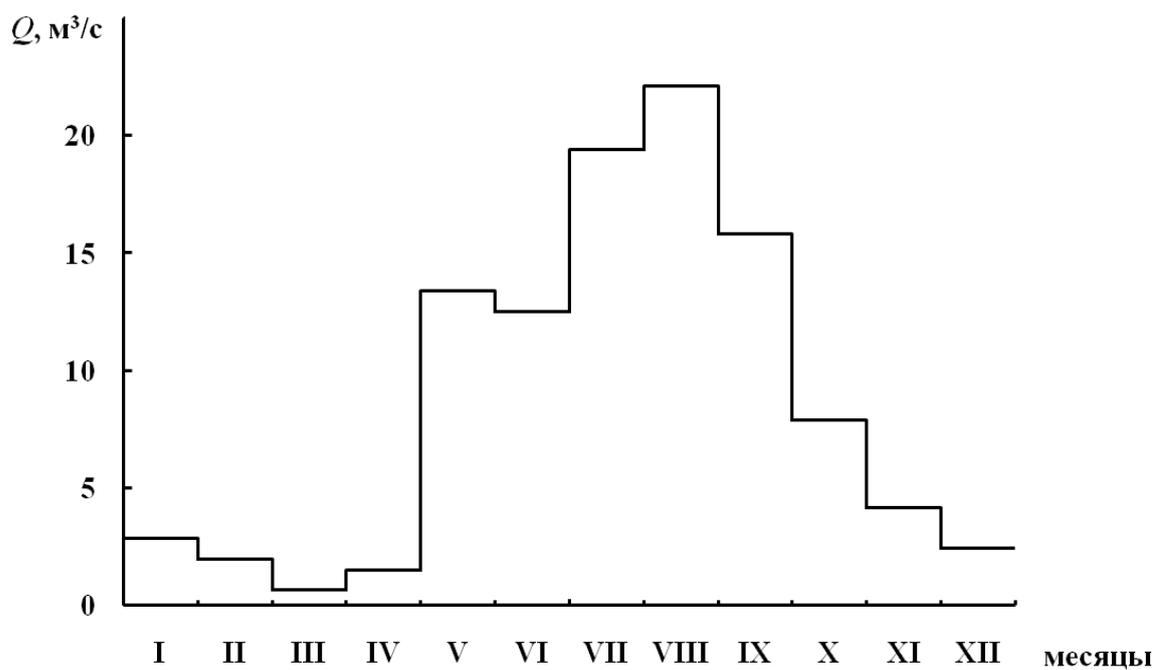


Рисунок 4 – Изменение среднемесячных расходов воды в течение года

Сравнение графиков позволяет оценить связь между изменением расходов и уровней воды, сделать вывод о ширине разлива реки во время паводка.

3 Построение графика связи бытовых уровней и расходов воды. По данным табл. 4 строят график связи бытовых уровней H и расходов Q воды для летних месяцев (рис. 5). На график наносят соответствующие точки и через них проводят усредненную кривую.

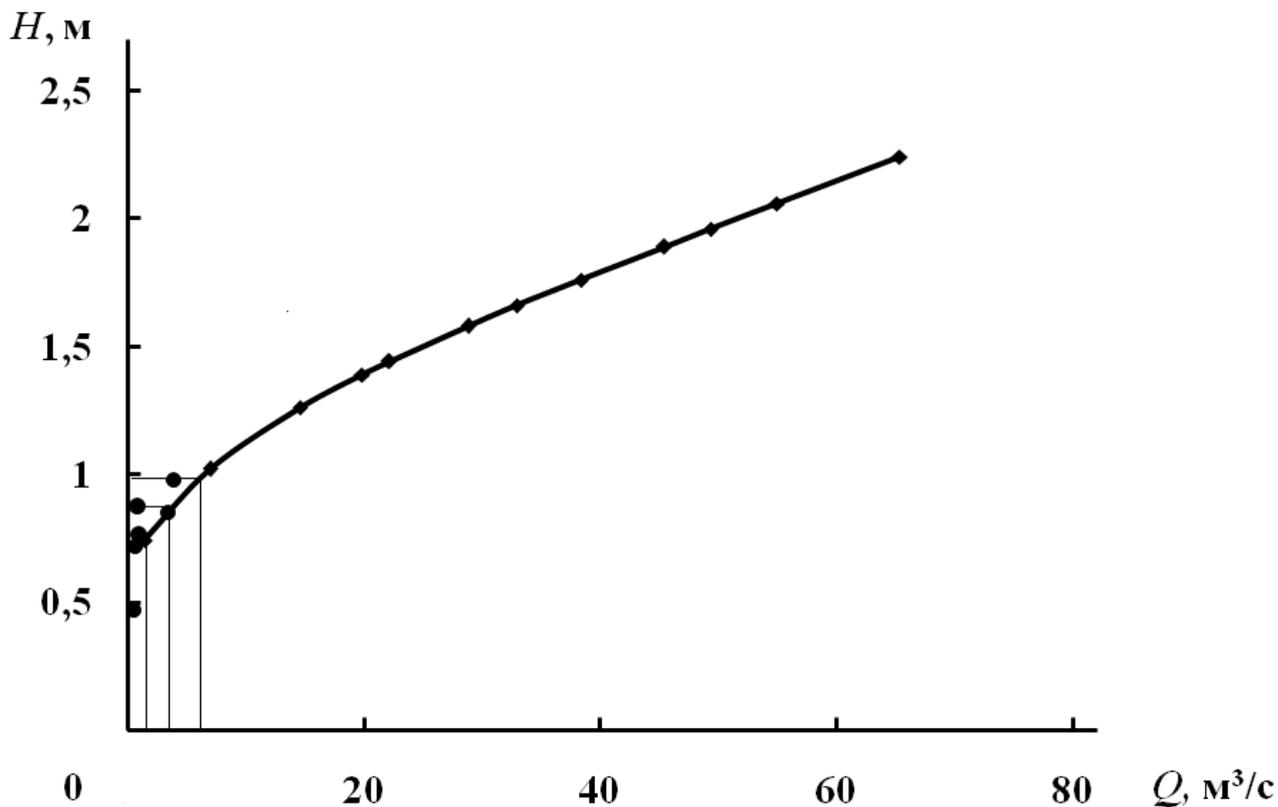


Рисунок 5 – График связи бытовых уровней и расходов воды

График связи уровней и расходов воды служит для определения величины расхода по известному значению уровня.

4 *Определение коэффициентов зимнего уменьшения расходов.* Из табл. 3 выбирают средние значения уровней и расходов воды для зимних месяцев, т.е. с ноября по апрель ($H_{\text{зим}}$ и $Q_{\text{зим}}$), и наносят на график связи.

По кривой на рис. 5 определяют соответствующие выбранным уровням $H_{\text{зим}}$ величины летних расходов $Q_{\text{лет}}$. Полученные значения $H_{\text{зим}}$, $Q_{\text{зим}}$ и $Q_{\text{лет}}$ заносят в табл. 5.

Для зимних месяцев вычисляют значения коэффициентов зимнего уменьшения расходов $K_{\text{зим}}$ по формуле

$$K_{\text{зим}} = \frac{Q_{\text{зим}}}{Q_{\text{лет}}}. \quad (1)$$

По полученным значениям строят график изменения коэффициента зимнего уменьшения расходов (рис. 6). При построении графика включают месяц, предшествующий зимнему периоду, и месяц, следующий за зимним периодом, т.е. октябрь и май. Для этих двух месяцев следует принять $K_{\text{зим}} = 1,0$.

Таблица 5 -Определение коэффициентов зимнего уменьшения расходов

Параметр	Месяц					
	XI	XII	I	II	III	IV
Среднемесячные значения уровня $H_{\text{зим}}$, м	0,98	0,87	0,76	0,72	0,7	0,85
Среднемесячные значения расхода $Q_{\text{зим}}$, м ³ /с	4,17	2,41	2,86	1,98	0,64	1,49
Среднемесячные значения расхода $Q_{\text{лет}}$, м ³ /с	6,0	3,0	2,0	1,2	1,1	4,0
Коэффициент зимнего уменьшения расходов $K_{\text{зим}}$	0,69	0,80	0,7	0,61	0,58	0,37

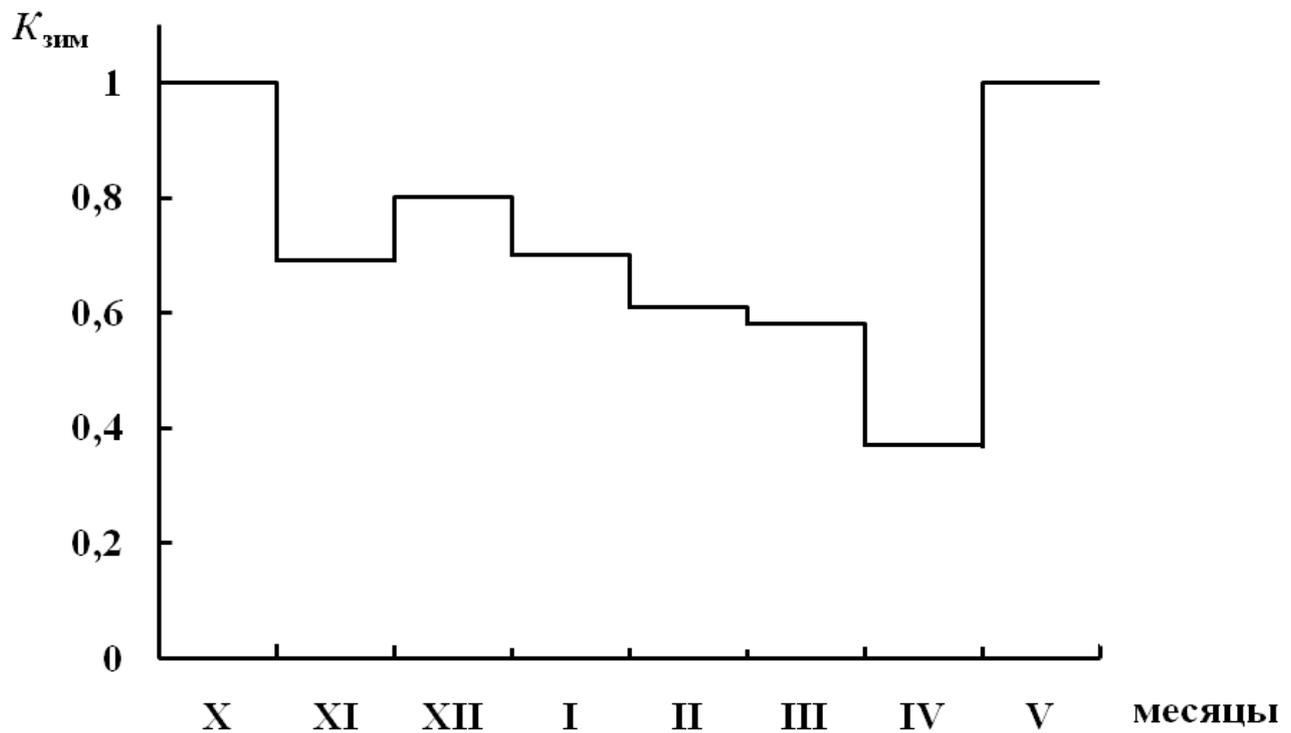


Рисунок 6 – Изменение коэффициента зимнего уменьшения расхода воды

Снижение значений расхода воды в зимний период вызвано наличием ледовых явлений на реке (льда, шуги и т.п.).

5 *Вывод*. В выводе указывают на совпадение (или несовпадение) максимумов помесечных гидрографов и водомерных графиков, сравнивается перепад значений уровней и расходов воды в период прохождения паводка и летней межени. Например: «Наименьшие значения расхода и уровня воды в летний период наблюдались в июне, а максимальные – в августе. В паводок расход воды увеличился на 77% $\left(\Delta Q = \frac{22,1 - 12,5}{12,5} 100\% = 77\% \right)$, а уровень воды – на 27% $\left(\Delta H = \frac{1,44 - 1,13}{1,13} 100\% = 27\% \right)$, что говорит о большой ширине разлива воды по поймам». Также указывается минимальное значение $K_{зим}$, месяц его наблюдения и причины снижения расходов воды зимой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ МНОГОЛЕТНИХ ДАННЫХ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Вводные понятия

Сток реки подвержен непрерывным колебаниям, на которые оказывают влияние многочисленные климатические, физико-географические и антропогенные факторы. Поэтому применяемый метод прогноза характеристик стока основан на обобщении методами теории вероятностей результатов гидрометрических наблюдений за длительный период времени. Продолжительность периода наблюдений считается достаточной, если величина относительной среднеквадратической ошибки не превышает 10 %.

Определение расчетных гидрологических характеристик осуществляется путем применения функций распределения ежегодных вероятностей превышения (называемых также кривыми обеспеченности). Кривая распределения ежегодных вероятностей превышения максимальных расходов воды является объективной характеристикой реки и показывает число случаев за расчетный период (в процентах), когда максимальный годовой расход будет не менее любого заданного значения; при этом предполагается, что основные факторы стока в будущем останутся неизменными.

Исходными данными являются результаты многолетних наблюдений за ежегодными максимальными расходами воды в водотоке.

Прядок выполнения работы

1 *Построение эмпирической кривой распределения.* В табл. 6 вписывают измеренные значения максимальных расходов воды в реке в хронологическом порядке. Далее строят ранжированный ряд, т.е. значения расходов воды записывают в убывающем порядке, и каждому члену ряда присваивают порядковый номер.

Далее определяют эмпирическую ежегодную вероятность превышения максимальных расходов, которая вычисляется для каждого члена ранжированного ряда, по формуле

$$p = \frac{m}{N + 1} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где m – порядковый номер члена ранжированного ряда; N – общее количество членов ряда, равное числу лет наблюдений.

Вычисленные значения заносят в табл. 6. Далее определяют среднее значение максимального расхода \bar{Q} , а также – для каждой строки – модульный коэффициент K_m по формулам

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{m=1}^N Q_m}{N} \quad \text{и} \quad K_m = \frac{Q_m}{\bar{Q}}. \quad (3)$$

При этом для столбцов 5 и 6 табл. 7 должен выполняться контроль:

$$\sum_{m=1}^N K_m = N \quad \text{и} \quad \sum_{m=1}^N (K_m - 1) = 0. \quad (4)$$

Если итог суммирования (с точностью до второго знака после запятой) отличается от требуемого (4), разница распределяется между слагаемыми. Только после этого вычисляют данные следующих столбцов таблицы. Далее строят эмпирическую кривую вероятности максимальных расходов воды, представляющую собой зависимость модульных коэффициентов K_m от вероятности превышения p . Для построения графика используется полулогарифмическая сетка.

Эмпирическая кривая обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, она имеет вид ломаной, т. е. не охватывает непрерывного ряда значений, которые может принять случайная величина расхода. Во-вторых, она не определена в зонах значений наименьших и наибольших вероятностей превышения ($p < 3,8\%$ и $p > 96,2\%$), особо необходимых для гидрологических расчетов.

Таблица 6 - Расчет эмпирической кривой вероятности превышения максимальных расходов воды

Натурные значения Q_m , м ³ /с		m	Вероятность p , %	Модульный коэффициент K_m	K_{m-1}	$(K_{m-1})^2$	$(K_{m-1})^3$
хронологический порядок	убывающий порядок						
150	820	1	3,8	3,24	2,24	5,01	11,22
200	710	2	7,7	2,80	1,80	3,25	5,87
340	360	3	11,5	1,42	0,42	0,18	0,08
210	350	4	15,4	1,38	0,38	0,15	0,06
270	340	5	19,2	1,34	0,34	0,12	0,04
220	330	6	23,0	1,30	0,30	0,09	0,03
230	310	7	26,8	1,22	0,22	0,05	0,01
100	290	8	30,6	1,15	0,15	0,02	0,00
210	270	9	34,4	1,07	0,07	0,00	0,00
70	270	10	38,2	1,07	0,07	0,00	0,00
310	260	11	42,0	1,03	0,03	0,00	0,00
50	230	12	45,8	0,91	-0,09	0,01	0,00
60	220	13	49,6	0,87	-0,13	0,02	0,00
20	210	14	53,4	0,83	-0,17	0,03	0,00
820	210	15	57,2	0,83	-0,17	0,03	0,00
140	200	16	61,0	0,79	-0,21	0,04	-0,01
180	180	17	64,8	0,71	-0,29	0,08	-0,02
270	180	18	68,6	0,71	-0,29	0,08	-0,02
290	150	19	72,4	0,59	-0,41	0,17	-0,07
350	140	20	76,2	0,55	-0,45	0,20	-0,09
330	100	21	80,0	0,39	-0,61	0,37	-0,22
180	70	22	83,8	0,28	-0,72	0,52	-0,38
260	60	23	87,6	0,24	-0,76	0,58	-0,44
360	50	24	91,4	0,20	-0,80	0,64	-0,52
710	20	25	95,2	0,08	-0,92	0,85	-0,78
$\sum_{m=1}^{25}$	6330	–	–	25	0,0	12,51	14,73

Устранить эти недостатки позволяет аналитическая кривая. Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых используются, как правило, трехпараметрическое гамма-распределение (распределение С.М. Крицкого – М.Ф. Менкеля) и биномиальное распределение. В соответствии с [5] биномиальное

распределение допускается применять только при соответствующем технико-экономическом обосновании.

2 *Вычисление статистических параметров для аналитической кривой распределения.* Аналитическая кривая математически определяется тремя параметрами: средним значением максимального расхода \bar{Q} , коэффициентом вариации C_v и отношением коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v . Эти параметры находят путем статистической обработки данных табл. 6. Сначала вычисляют значения отклонений модульного коэффициента от единицы K_m-1 и записывают в соответствующую графу табл. 6. Далее построчно вычисляют квадраты отклонений модульных коэффициентов от единицы $(K_m - 1)^2$ и находят их сумму.

Расчетный коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s определяются методом моментов, т.е. вычисляются по формулам

$$C_v = \left(a_1 + \frac{a_2}{N} \right) + \tilde{C}_v \left(a_3 + \frac{a_4}{N} \right) + \tilde{C}_v^2 \left(a_5 + \frac{a_6}{N} \right), \quad (5)$$

$$C_s = \left(b_1 + \frac{b_2}{N} \right) + \tilde{C}_s \left(b_3 + \frac{b_4}{N} \right) + \tilde{C}_s^2 \left(b_5 + \frac{b_6}{N} \right), \quad (6)$$

где a_1, \dots, a_6 и b_1, \dots, b_6 – коэффициенты, определяемые по табл. 7 и 8 в зависимости от отношения \tilde{C}_s/\tilde{C}_v и коэффициента автокорреляции $r(1)$; \tilde{C}_v, \tilde{C}_s – соответственно смещенные оценки коэффициентов вариации и асимметрии, определяемые по формулам

$$\tilde{C}_v = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (K_m - 1)^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

$$\tilde{C}_s = \frac{N \sum_{m=1}^N (K_m - 1)^3}{\tilde{C}_v^3 (N - 1)(N - 2)}. \quad (8)$$

Коэффициент вариации показывает, на какую величину в среднем члены ряда отклоняются от среднего значения ряда. В случае $N=1$ (ряд состоит из одного члена) среднеквадратическое отклонение должно быть неопределённым $\left(\tilde{C}_v = \sqrt{\frac{0}{0}} \right)$. Коэффициент асимметрии характеризует асимметричность кривой

плотности распределения случайной величины. Для достоверной оценки коэффициента асимметрии требуются данные за 50-70 лет натуральных наблюдений. При недостаточной длине гидрологического ряда величина \tilde{C}_s может оказаться отрицательной. В этом случае расчетные значения отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации следует принимать, как среднее из значений, установленных по данным группы рек с наиболее продолжительными наблюдениями в гидрологически однородном районе [5]. Для рек равнинной местности в лабораторной работе можно принять $\tilde{C}_s = 2\tilde{C}_v$, для горных и предгорных рек – $\tilde{C}_s = 4\tilde{C}_v$.

Таблица 7 - Значения коэффициентов a

\tilde{C}_s/\tilde{C}_v	$r(1)$	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
2	0	0	0,19	0,99	-0,88	0,01	1,54
	0,3	0	0,22	0,99	-0,41	0,01	1,51
	0,5	0	0,18	0,98	0,41	0,02	1,47
3	0	0	0,69	0,98	-4,34	0,01	6,78
	0,3	0	1,15	1,02	-7,53	-0,04	12,38
	0,5	0	1,75	1,00	-11,79	-0,05	21,13
4	0	0	1,36	1,02	-9,68	-0,05	15,55
	0,3	0,02	2,61	1,13	-19,85	-0,22	34,18
	0,5	-0,02	3,47	1,18	-29,71	-0,41	58,08

Таблица 8 - Значения коэффициентов b

$r(1)$	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
0	0,03	2,00	0,92	-5,09	0,03	8,10
0,3	0,03	1,77	0,93	-3,45	0,03	8,03
0,5	0,03	1,63	0,92	-0,97	0,03	7,94

Для условий рассматриваемого примера

$$\bar{Q} = 253; \quad \tilde{C}_v = \sqrt{\frac{12,51}{25-1}} = 0,72; \quad \tilde{C}_s = \frac{25 \cdot 14,73}{0,72^3 \cdot 24 \cdot 23} = 1,79 \quad \text{и} \quad \frac{\tilde{C}_s}{\tilde{C}_v} = \frac{1,79}{0,72} = 2,48.$$

Коэффициент автокорреляции определяется по формуле

$$r(1) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (q_i - \bar{q}_1) \cdot (q_{i+1} - \bar{q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=2}^N (q_i - \bar{q}_1)^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (q_i - \bar{q}_2)^2}}, \quad (9)$$

где

$$\bar{Q}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} Q_i}{(N-1)} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i - Q_N}{(N-1)}, \quad \bar{Q}_2 = \frac{\sum_{i=2}^N Q_i}{(N-1)} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i - Q_1}{(N-1)}.$$

Множество его значений находится в интервале от 0 до 1 включительно. Коэффициент автокорреляции показывает степень связи между членами ряда. Значение $r(1)$, близкое к 0, свидетельствует о преобладающей доле случайного фактора в наблюдениях.

Расчеты ведут в табличной форме (см. табл. 9). Для данных из табл. 6 $\bar{Q}_1 = 262,92$ и $\bar{Q}_2 = 229,58$, а коэффициент автокорреляции, вычисленный по формуле (9),

$$r(1) = \frac{548229}{\sqrt{745096 \cdot 467096}} = 0,929. \quad (10)$$

Коэффициент корреляции можно вычислить и с помощью электронных таблиц Excel, воспользовавшись встроенной функцией КОРРЕЛ.

При $r(1) > 0,5$ в табл. 7 и 8 выбирают значения коэффициентов a_1, \dots, a_6 и b_1, \dots, b_6 для $r(1)=0,5$.

Тогда

$$C_v = \left(0 + \frac{0,18}{25}\right) + 0,72 \left(0,98 + \frac{0,41}{25}\right) + 0,72^2 \left(0,02 + \frac{1,47}{25}\right) = 0,85;$$

$$C_s = \left(0,03 + \frac{1,63}{25}\right) + 1,79 \left(0,92 - \frac{0,97}{25}\right) + 1,79^2 \left(0,03 + \frac{7,94}{25}\right) = 2,79;$$

$$\frac{C_s}{C_v} = \frac{2,79}{0,85} = 3,28.$$

3 Аппроксимация эмпирической кривой биномиальной зависимостью. Для расчета координат аналитической кривой обеспеченности используются нормированные отклонения Φ_p от среднего значения биномиальной кривой вероятности. Для этого из табл. 1 приложения А выписывают величины Φ_p , соответствующие вычисленному значению C_s и выбранным значениям вероятности превышения p .

Далее находят модульные коэффициенты по формуле

$$K_p = \Phi_p C_v + 1 \quad (11)$$

и определяют значения расходов разной обеспеченности по формуле

$$Q_p = \bar{Q} K_p. \quad (12)$$

Результаты расчетов заносят в табл. 9 и строят график аналитической кривой вероятности превышения максимальных расходов.

Таблица 9 - Расчет коэффициента автокорреляции

№	Q_i	$Q_i - \bar{Q}_1$	$Q_{i+1} - \bar{Q}_2$	$(Q_i - \bar{Q}_1) \cdot (Q_{i+1} - \bar{Q}_2)$	$(Q_i - \bar{Q}_1)^2$	$(Q_i - \bar{Q}_2)^2$
1	820	557,08	480,42	267632,12	310341,84	230800,17
2	710	447,08	130,42	58307,12	199883,51	17008,51
3	360	97,08	120,42	11690,45	9425,17	14500,17
4	350	87,08	110,42	9615,45	7583,51	12191,84
5	340	77,08	100,42	7740,45	5941,84	10083,51
6	330	67,08	80,42	5394,62	4500,17	6466,84
7	310	47,08	60,42	2844,62	2216,84	3650,17
8	290	27,08	40,42	1094,62	733,51	1633,51
9	270	7,08	40,42	286,28	50,17	1633,51
10	270	7,08	30,42	215,45	50,17	925,17
11	260	-2,92	0,42	-1,22	8,51	0,17
12	230	-32,92	-9,58	315,45	1083,51	91,84
13	220	-42,92	-19,58	840,45	1841,84	383,51
14	210	-52,92	-19,58	1036,28	2800,17	383,51
15	210	-52,92	-29,58	1565,45	2800,17	875,17
16	200	-62,92	-49,58	3119,62	3958,51	2458,51
17	180	-82,92	-49,58	4111,28	6875,17	2458,51
18	180	-82,92	-79,58	6598,78	6875,17	6333,51
19	150	-112,92	-89,58	10115,45	12750,17	8025,17
20	140	-122,92	-129,58	15927,95	15108,51	16791,84
21	100	-162,92	-159,58	25998,78	26541,84	25466,84
22	70	-192,92	-169,58	32715,45	37216,84	28758,51
23	60	-202,92	-179,58	36440,45	41175,17	32250,17
24	50	-212,92	-209,58	44623,78	45333,51	43925,17
25	20					
Сумма				548229	745096	467096

По полученным значениям K и p строят аналитическую кривую вероятности на полулогарифмической сетке, называемой клетчаткой вероятности (см. рис. 7). Данные для построения горизонтальной шкалы клетчатки вероятностей приведены в табл. приложения Б. В ней буквой x обозначены расстояния от **середины** шкалы, соответствующей значению $p=50\%$, до требуемой абсциссы. А вертикальная шкала клетчатки – равномерная.

4 Аппроксимация эмпирической кривой трехпараметрической зависимостью (кривая С.М. Крицкого – М.Ф. Менкеля). Из табл. 2 приложения А выписывают в табл. 10 величины K_p , соответствующие отношению $\frac{C_s}{C_v}$ (в условиях примера оно равно 3), вычисленному значению C_v и выбранным значениям вероятности превышения p . На следующем этапе строят аналитическую кривую вероятности.

Таблица 10 - Расчет ординат аналитической кривой вероятности

Кривая		Вероятность превышения p , %								
		0,1	1	5	20	50	80	95	99	99,9
1	Φ_p	6,86	3,96	2,00	0,44	-0,39	-0,67	-0,71	-	-
	K_p	6,83	4,37	2,7	1,37	0,67	0,43	0,4	-	-
	Q_p	1728	1106	683	347	170	108	101	-	-
2	K_p	6,31	3,92	2,51	1,45	0,78	0,41	0,21	0,12	0,06
	Q_p	1596	992	635	367	197	104	53	30	15

Примечание. 1 – биномиальная кривая; 2 – трехпараметрическая кривая

Анализ графиков показывает, что в области малых значений ВП биномиальная кривая проходит ближе к эмпирической кривой.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО СТОКА РЕКИ

Вводные понятия

Речными наносами называются продукты разрушения земной коры в виде сыпучих материалов, перемещаемых потоком воды в речном русле. Расход и сток наносов обычно устанавливается одновременно с определением расхода и стока воды в реке. В зависимости от характера передвижения наносы подразделяются на взвешенные и донные. Взвешенные наносы мелких фракций подхватываются восходящими струями речного потока и движутся с массой воды. Донные наносы перемещаются под действием пульсации придонных струй или находятся в состоянии покоя. Если скорость течения воды увеличивается, донные наносы переходят во взвешенное состояние и наоборот – при уменьшении скорости часть наиболее крупных взвешенных наносов начинает перемещаться по дну. Количество взвешенных наносов, содержащихся в воде, характеризуется мутностью p , г/м³.

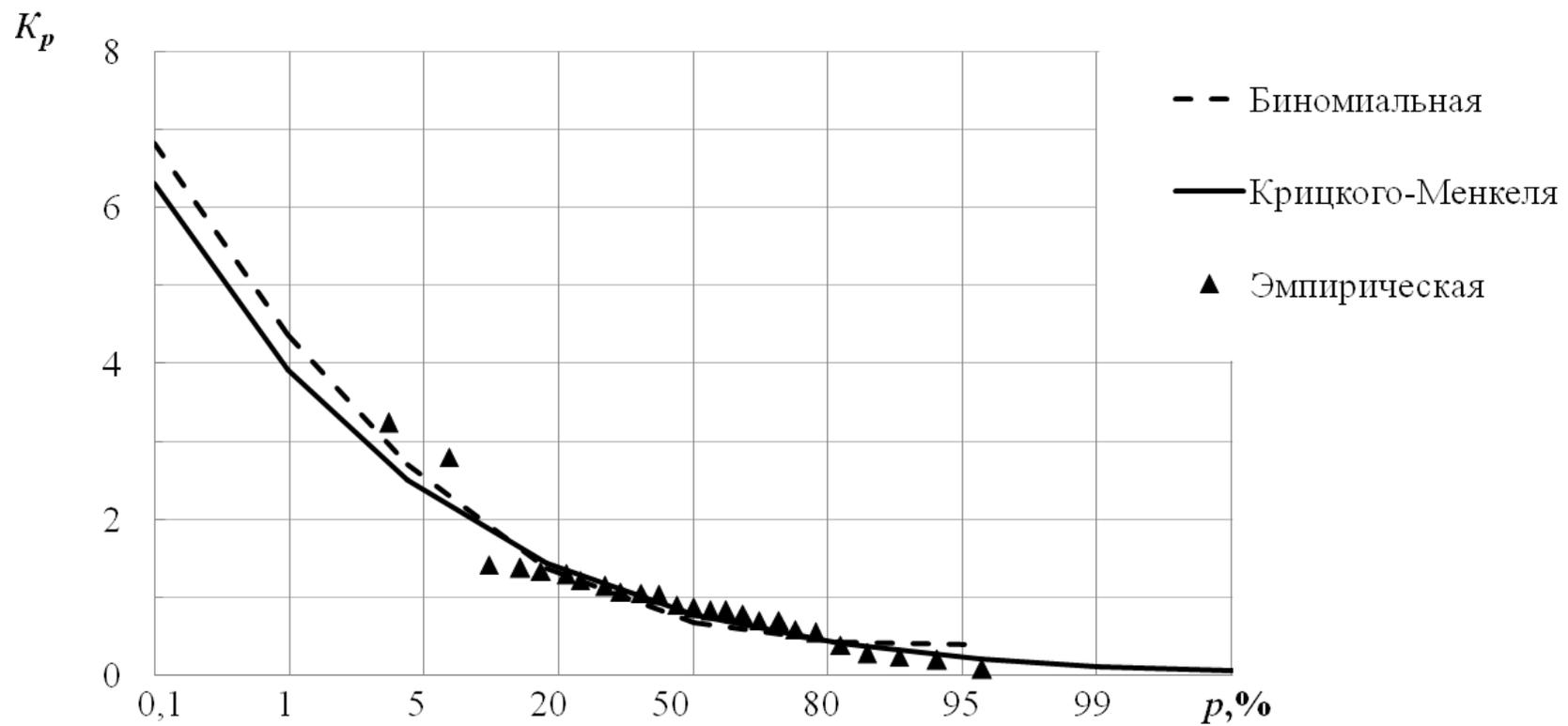


Рисунок 6 – Кривые обеспеченности максимальных расходов воды

Порядок выполнения работы

1 *Сбор данных.* Для определения характеристик твердого стока реки из таблицы «Взвешенные наносы» гидрологического ежегодника выписывают среднемесячные значения мутности для всех месяцев года и помещают в табл. 11. В нее же из таблицы «Ежедневные расходы воды» гидрологического ежегодника записывают значения среднемесячных расходов воды.

Таблица 11 - Взвешенные наносы

Месяц	Мутность ρ , г/м ³	Расход воды Q_p , м ³ /с	Массовый расход наносов $Q_{н.мас}$, кг/с	Объемный расход наносов $Q_{н.об}$, м ³ /с	Объем наносов V_n , м ³	Накопленная сумма объемов $\sum V_n$, м ³
I	0	2,86	0	0	0	0
II	0	1,98	0	0	0	0
III	0	0,64	0	0	0	0
IV	20	1,49	0,030	$2,71 \cdot 10^{-5}$	70	70
V	80	13,4	1,072	$9,75 \cdot 10^{-4}$	2610	2680
VI	27	12,5	0,338	$3,07 \cdot 10^{-4}$	795	3476
VII	21	19,4	0,407	$3,70 \cdot 10^{-4}$	992	4468
VIII	28	22,1	0,619	$5,63 \cdot 10^{-4}$	1507	5974
IX	10	15,8	0,158	$1,44 \cdot 10^{-4}$	372	6347
X	7,3	7,88	0,058	$5,23 \cdot 10^{-5}$	140	6487
XI	5,7	4,17	0,024	$2,16 \cdot 10^{-5}$	56	6543
XII	0	2,41	0	0	0	6543

2 *Расчет среднемесячных значений массового и объемного расходов наносов.* Массовый расход наносов определяют по формуле

$$Q_{н.мас} = \rho Q_p \cdot \quad (13)$$

При этом необходимо перевести единицы измерения мутности воды из г/м³ в кг/м³.

Объемный расход наносов вычисляют по формуле

$$Q_{н.об} = \frac{Q_{н.мас}}{\rho}, \quad (14)$$

где ρ – плотность взвешенных наносов, которую с учетом взвешивающего действия воды принимают равной 1100 кг/м³.

3 *Вычисление объемов твердого стока.* Месячный объем твердого стока определяют для всех месяцев по формуле

$$V_n = Q_{н.об} T, \quad (15)$$

где T – число секунд в месяце (см. лабораторную работу 1, с. 5).

4 *Построение графиков.* По данным табл. 12 строят график «Динамика расхода наносов» (рис. 8). На него выносятся вычисленные значения средне-месячного объемного расхода взвешенных наносов $Q_{н.об.}$. Далее строят график «Интегральная кривая твердого стока (взвешенные наносы)» (рис. 9).

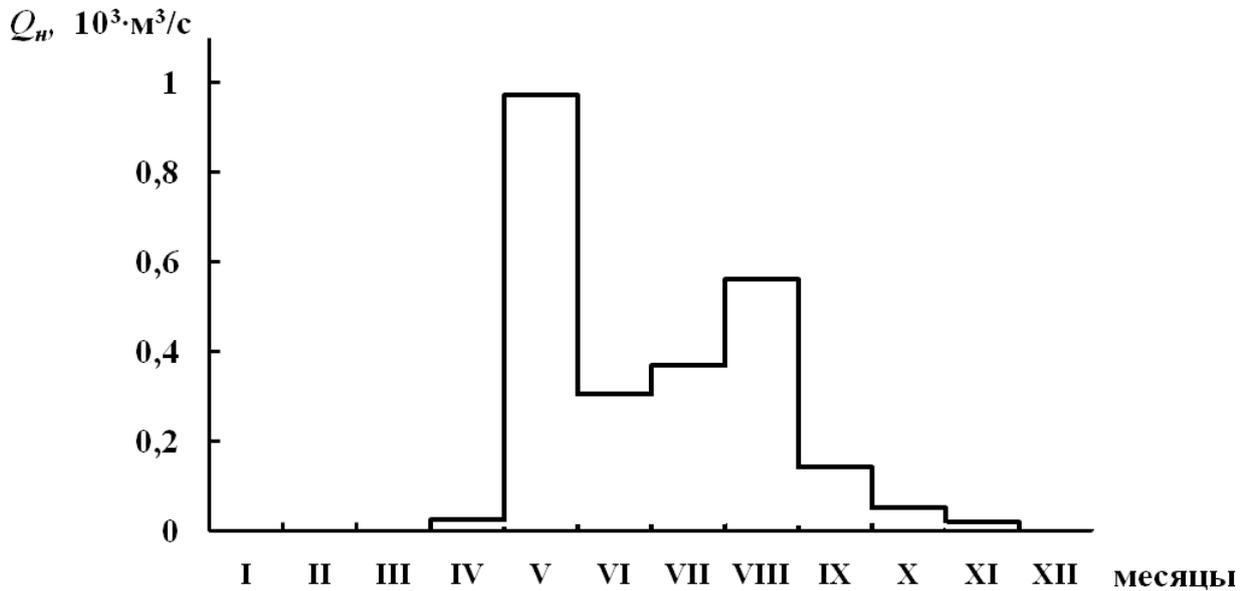


Рисунок 8 – Динамика расхода наносов

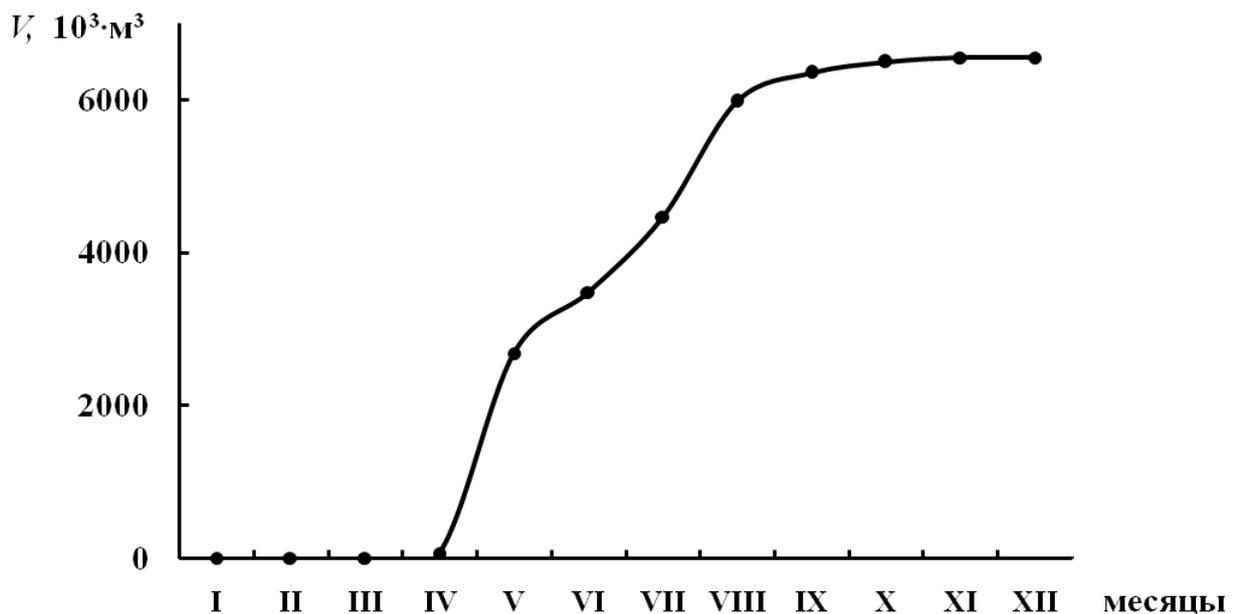


Рисунок 9 – Интегральная кривая твердого стока

Данная кривая представляет собой изменение объема твердого стока реки, полученного нарастающей суммой с первого до последнего дня года.

5 Вывод. В заключение отмечается максимальное значение расхода наносов и месяц, на который оно приходится.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗИМНЕГО РЕЖИМА РЕКИ

Вводные понятия

Началом зимнего периода считается момент появления льда на реке. За конец зимнего периода принимается момент полного освобождения реки от льда. Зимний период делится на три фазы: замерзание, ледостав и вскрытие. Замерзание заканчивается образованием сплошного ледяного покрова, а ледостав завершается вскрытием реки. Образование на реках в зимнее время ледяного покрова изменяет режим течения. Ледяной покров вначале возникает на мелководье: у берегов, в заливах. На неглубоких местах с малыми скоростями течения вода охлаждается наиболее интенсивно.

Особенности зимнего режима рек учитывают при проектировании, строительстве и эксплуатации мостовых переходов.

Порядок выполнения работы

1 *Анализ зимних явлений на реке.* Даты наступления явлений зимнего режима на реке устанавливаются по данным таблицы «Ежедневные уровни воды» гидрологического ежегодника. Их заносят в табл. 12. По данным табл. 12 необходимо написать вывод о явлениях, происходящих в зимний период, проанализировать их продолжительность.

Таблица 12 - Основные явления зимнего режима

Явление	Дата первого наблюдения	Дата последнего появления
Забереги	16.11	21.11
Шуга осенняя	16.11	17.11
Зажор	-	-
Ледоход осенний	18.11	20.11
Ледостав	21.11	10.04
Вода поверх льда	05.04	05.04
Закраины	05.04	05.04
Подвижка льда	10.04	10.04
Ледоход весенний	11.04	14.04
Шуга весенняя	11.04	12.04
Конец зимнего периода	15.04	-

2 Построение графика «Динамика изменения толщины льда». Из таблицы «Толщина льда» гидрологического ежегодника выписывают значения толщины льда по декадам. Данные заносят в табл. 13.

Таблица 13 - Изменение толщины льда, см

Декада	Месяц					
	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель
I	-	13	27	20	19	10
II	-	13	25	15	18	-
III	15	21	21	14	15	-

По данным табл. 13 строят график изменения толщины ледяного покрова. График охватывает месяцы зимнего периода и имеет ступенчатую форму (см. рис. 10).

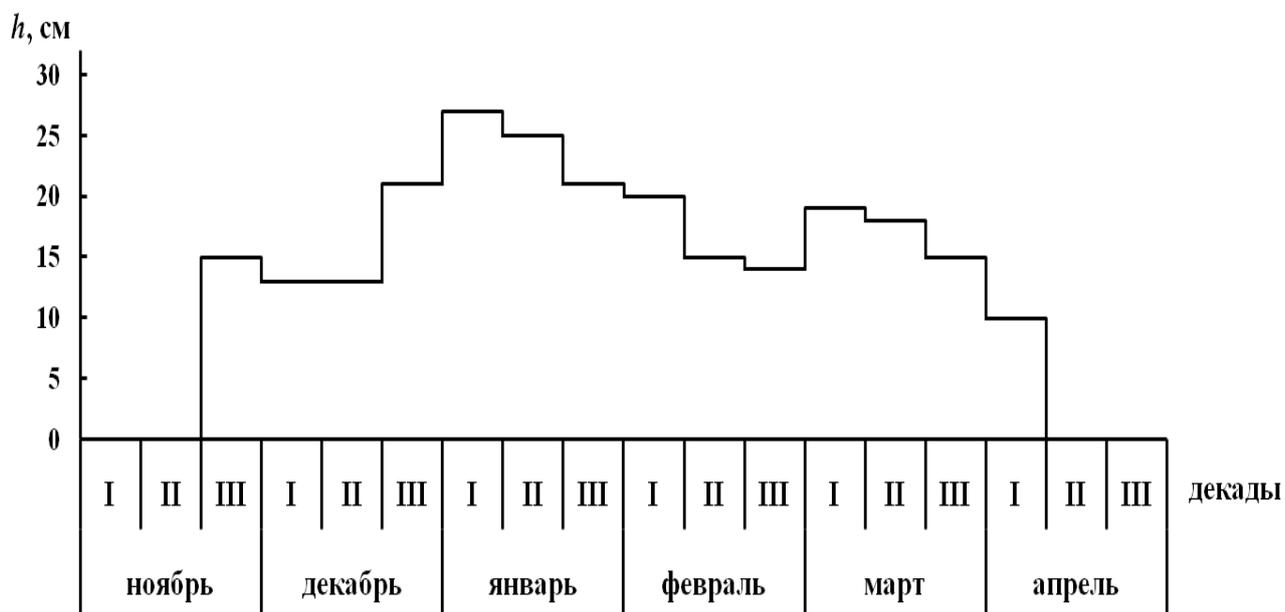


Рисунок 10 – Динамика изменения толщины льда

3 Вывод. В конце работы указывается величина, на которую уменьшается толщина льда в конце зимнего периода по сравнению с максимальной измененной толщиной льда

$$\left(\Delta H = \frac{27 - 10}{27} \cdot 100\% \approx 63\% \right).$$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федотов Г.А., Изыскания и проектирование мостовых переходов: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. и транспортного стр-ва. – М.: Академия, 2005. – 304 с.
2. Константинов, Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: учебник для вузов: в 2 ч. Ч. 2. Специальные вопросы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. – М.: Высш. шк., 1987. – 431 с.
3. Гавриш, Ю.Е. Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения: конспект лекций / Ю.Е. Гавриш. 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. – 44 с.
4. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1984 г. / Красноярское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды. – Обнинск, ВНИИГМИ-МПД, 1986. – Ч. 1 и 2. – Т. 1. – Вып. 12. – 379 С.
5. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 74 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1 - Отклонения от среднего значения ординат биномиальной кривой распределения

C_s	Отклонения Φ_p при вероятности превышения p , %								
	0,1	1	5	20	50	80	95	99	99,9
0,00	3,09	2,33	1,64	0,84	0,00	-0,84	-1,64	-2,33	-3,09
0,10	3,23	2,40	1,67	0,84	-0,02	-0,85	-1,61	-2,25	-2,95
0,20	3,33	2,47	1,70	0,83	-0,03	-0,85	-1,58	-2,18	-2,81
0,30	3,52	2,54	1,72	0,82	-0,05	-0,85	-1,55	-2,10	-2,67
0,40	3,66	2,61	1,75	0,82	-0,07	-0,85	-1,52	-2,03	-2,54
0,50	3,81	2,68	1,77	0,81	-0,08	-0,85	-1,49	-1,96	-2,40
0,60	3,96	2,75	1,80	0,80	-0,10	-0,85	-1,45	-1,88	-2,27
0,70	4,10	2,82	1,82	0,79	-0,12	-0,85	-1,42	-1,81	-2,14
0,80	4,24	2,89	1,84	0,78	-0,13	-0,85	-1,38	-1,74	-2,02
0,90	4,38	2,96	1,86	0,77	-0,15	-0,85	-1,35	-1,66	-1,90
1,00	4,53	3,02	1,88	0,76	-0,16	-0,85	-1,32	-1,59	-1,79
1,10	4,67	3,09	1,89	0,74	-0,18	-0,85	-1,28	-1,52	-1,68
1,20	4,81	3,15	1,91	0,73	-0,19	-0,84	-1,24	-1,45	-1,58
1,30	4,95	3,21	1,92	0,72	-0,21	-0,84	-1,20	-1,38	-1,48
1,40	5,09	3,27	1,94	0,71	-0,22	-0,84	-1,17	-1,32	-1,39
1,50	5,23	3,33	1,95	0,69	-0,24	-0,82	-1,13	-1,26	-1,31
1,60	5,37	3,39	1,96	0,68	-0,25	-0,81	-1,10	-1,20	-1,24
1,70	5,50	3,44	1,97	0,66	-0,27	-0,81	-1,06	-1,14	-1,17
1,80	5,64	3,50	1,98	0,64	-0,28	-0,80	-1,02	-1,09	-1,11
1,90	5,77	3,55	1,99	0,63	-0,29	-0,79	-0,98	-1,04	-1,05
2,00	5,91	3,60	2,00	0,61	-0,31	-0,78	-0,95	-0,99	-1,00
2,10	6,04	3,65	2,01	0,59	-0,32	-0,76	-0,91	-0,94	-0,95
2,20	6,14	3,68	2,02	0,57	-0,33	-0,75	-0,88	-0,90	-0,91
2,30	6,26	3,73	2,01	0,55	-0,34	-0,74	-0,85	-0,87	-0,87
2,40	6,37	3,78	2,00	0,52	-0,35	-0,72	-0,82	-0,83	-0,83
2,50	6,50	3,82	2,00	0,50	-0,36	-0,66	-0,77	-0,77	-0,80
2,60	6,54	3,86	2,00	0,48	-0,37	-0,70	-0,76	-0,78	-0,78
2,70	6,75	3,92	2,00	0,46	-0,38	-0,68	-0,74	-0,74	-0,74
2,80	6,86	3,96	2,00	0,44	-0,39	-0,67	-0,71	-	-

Таблица 2 -Трехпараметрическое гамма-распределение (С.М. Крицкого – М.Ф. Менкеля)

P, %	Коэффициенты расхода K_p при коэффициентах вариации C_v						
	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$C_s/C_v = 2$							
0,1	1,34	1,73	2,70	3,89	5,30	6,91	8,65
0,5	1,28	1,59	2,38	3,20	4,19	5,30	6,50
1	1,25	1,52	2,16	2,89	3,71	4,61	5,50
3	1,20	1,41	1,88	2,39	2,94	3,51	4,05
5	1,17	1,35	1,74	2,15	2,57	3,0	3,45
20	1,08	1,16	1,31	1,44	1,54	1,61	1,62
50	1,00	0,99	0,95	0,88	0,80	0,69	0,58
80	0,92	0,83	0,66	0,49	0,35	0,22	0,13
95	0,84	0,70	0,45	0,25	0,13	0,05	0,02
99	0,78	0,59	0,31	0,13	0,04	0,01	0,002
99,9	0,72	0,49	0,19	0,05	0,008	0,001	$0,4 \cdot 10^{-4}$
$C_s/C_v = 3$							
0,1	1,35	1,80	3,00	4,58	6,31	8,43	10,68
0,5	1,29	1,63	2,48	3,5	4,58	5,85	7,16
1	1,25	1,55	2,25	3,07	3,92	4,80	5,85
3	1,21	1,42	1,91	2,42	2,94	3,47	3,99
5	1,17	1,36	1,75	2,14	2,51	2,89	3,23
20	1,09	1,16	1,29	1,38	1,45	1,49	1,50
50	0,99	1,03	0,93	0,86	0,78	0,70	0,61
80	0,91	0,88	0,67	0,53	0,41	0,31	0,22
95	0,84	0,76	0,49	0,33	0,21	0,13	0,07
99	0,79	0,62	0,37	0,21	0,12	0,06	0,03
99,9	0,73	0,53	0,27	0,13	0,06	0,02	0,007
$C_s/C_v = 4$							
0,1	1,38	1,87	3,29	5,07	7,02	9,25	11,65
0,3	1,34	1,73	2,81	4,09	5,46	9,94	8,54
0,5	1,30	1,67	2,60	3,69	4,81	6,02	7,31
1	1,23	1,58	2,34	3,17	4,01	4,90	5,82
3	1,19	1,43	1,92	2,44	2,90	3,35	3,84
5	1,17	1,36	1,75	2,11	2,45	2,77	3,07
20	1,08	1,15	1,26	1,34	1,40	1,42	1,43
50	0,99	0,98	0,92	0,85	0,78	0,71	0,63
80	0,91	0,83	0,68	0,55	0,45	0,36	0,27
95	0,85	0,72	0,52	0,37	0,26	0,18	0,12
99	0,80	0,64	0,42	0,27	0,17	0,11	0,06
99,9	0,74	0,56	0,33	0,104	0,104	0,054	0,026

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица - Координаты горизонтальной шкалы клетчатки вероятностей

<i>p</i> , %	<i>x</i> , мм						
50	0	32 и 68	20,1	17 и 83	41,0	8 и 92	60,4
48 и 52	2,1	30 и 70	22,5	16 и 84	42,7	7 и 93	63,5
46 и 54	4,3	28 и 72	25,0	15 и 85	44,6	6 и 94	66,8
44 и 56	6,5	26 и 74	27,6	14 и 86	46,5	5 и 95	70,7
42 и 58	8,7	24 и 76	30,3	13 и 87	48,0	4 и 96	75,3
40 и 60	10,9	22 и 78	33,2	12 и 88	50,6	3 и 97	80,9
38 и 62	13,1	20 и 80	36,2	11 и 89	52,7	2 и 98	88,3
36 и 64	15,4	19 и 81	37,7	10 и 90	55,1	1 и 99	100
34 и 66	17,7	18 и 82	39,3	9 и 91	57,6	0,1 и 99,9	133

Учебное издание

Гавриленко Татьяна Валентиновна, Гавриш Юрий Евгеньевич

Инженерная гидрология. Определение расчетных гидрологических характеристик

Подготовлено к изданию РИО БИК СФУ

Подписано в печать 31.01.2012 г. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать плоская.

Усл. печ. л. 1,9. Уч. – изд. л. 0,12.

Тираж 85 экз. Заказ № 6099.

Редакционно-издательский отдел
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел/факс (391) 2062149. E-mail rio@sfu-kras.ru
<http://rio.sfu.kras.ru>