

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Кораблестроение и гидравлика»

ГИДРОЛОГИЯ

Практикум

для студентов специальностей

1-70 03 01 «Автомобильные дороги»,

1-70 03 02 «Мосты, транспортные дороги и метрополитены»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области строительства и архитектуры*

Минск
БНТУ
2019

УДК 556.5.048(075.8)

ББК 26.22я7

P24

С о с т а в и т е л и:

И. М. Шаталов, В. Н. Юхновец, М. М. Михновец

Р е ц е н з е н т ы:

заведующий кафедрой «ЭГиТ» Белорусского
государственного технологического университета,
канд. техн. наук, доцент *А. С. Дмитриченко*;
зав. отделом исследований в области водного транспорта
РУП БелНИИТ «Транстехника» Министерства транспорта
и коммуникаций РБ *А. П. Афанасьев*

P24 **Гидрология** : практикум для студентов специальностей 1-70 03 01 «Автомобильные дороги», 1-70 03 02 «Мосты, транспортные дороги и метрополитены» / сост.: И. М. Шаталов, В. Н. Юхновец, М. М. Михновец. – Минск: БНТУ, 2019. – 43 с.
ISBN 978-985-583-079-6.

Практикум по дисциплине гидрология составлен для студентов дневного и заочного обучения строительных специальностей. В нем изложены современные методы гидрологических расчетов, которые используются при проектировании гидротехнических, мелиоративных и дорожных водопропускных сооружений. В практикуме использована научно-техническая информация современной гидрологической литературы, приведенной в списке использованных литературных источников.

УДК 556.5.048(075.8)

ББК 26.22я7

ISBN 978-985-583-079-6

© Белорусский национальный
технический университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	5
ЗАДАНИЕ 1. Построение и экстраполяция кривой расходов воды в створе реки	6
ЗАДАНИЕ 2. Расчет и построение кривой обеспеченности (кривой распределения вероятностей превышения) гидрологических характеристик.....	19
ЗАДАНИЕ 3. Приведение параметров кривой распределения гидрологических характеристик к многолетнему периоду	29
ЛИТЕРАТУРА	36
ПРИЛОЖЕНИЯ	37
Приложение 1. Данные к построению кривой расходов	37
Приложение 2. Данные к выполнению задания 2	39
Приложение 3. Данные к выполнению задания 3	41

ВВЕДЕНИЕ

В практикуме изложены современные методы решения задач по построению и экстраполяции кривой расходов воды в беспойменном русле; по расчету и построению кривой обеспеченности однородных гидрологических величин с использованием методов наибольшего правдоподобия, моментов и квантелей; по приведению параметров кривой распределения гидрологических величин к многолетнему периоду. Практикум позволяет приобрести практические навыки при выполнении гидрологических расчетов, составляющих важную часть изучаемого курса гидрологии и гидрометрии.

Практические или лабораторные занятия включают выполнение трех заданий:

1. Построение и экстраполяция кривой расходов воды в створе реки.
2. Расчет и построение кривой обеспеченности (вероятностей, превышений) гидрологических характеристик для определения их расчетных значений.
3. Приведение параметров кривой распределения гидрологических характеристик к многолетнему периоду.

Все расчеты производятся по исходным данным, выбираемым из кадастровых материалов. Данные приведены в таблицах приложений 1–3 по вариантам. Обучающийся выбирает вариант в соответствии с последней цифрой своего шифра (порядковый номер в зачетной книжке или зачетной ведомости).

В практикуме приводится краткое теоретическое освещение изучаемых вопросов и рассматривается конкретное решение отдельных задач.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q – расход воды, м³/с;

H – уровень воды, м;

J – уклон водной поверхности;

ω – площадь живого сечения реки, м²;

v – средняя скорость течения воды в живом сечении, м/с;

b – ширина реки в сечении по урезам, м;

h – средняя глубина в сечении, м;

R – гидравлический радиус, $R = \omega/x$, м;

x – смоченный периметр, м;

C – коэффициент Шези

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}, \text{ м}^{0,5}/\text{с};$$

n – коэффициент шероховатости русла;

n_i – частота и длина статистического ряда;

P – обеспеченность или вероятность превышения, %;

K – переходный или модульный коэффициент, т. е. безразмерная единица стока,

$$K = \frac{x}{\bar{x}} = \frac{Q}{\bar{Q}};$$

\bar{Q} – среднее значение расхода в совокупности,

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n_i};$$

C_v – коэффициент вариации (изменчивости);

σ_Q – среднее квадратическое отклонение ряда расходов воды;

C_s – коэффициент асимметрии кривой;

r – коэффициент корреляции;

a – символ реки-аналога;

N – продолжительность периода наблюдений представительного статистического ряда.

ЗАДАНИЕ 1

Построение и экстраполяция кривой расходов воды в створе реки

Цель работы:

1. Определить постоянные уравнения кривой расходов $Q = a(H + H_0)^m$, графическим методом и методом наименьших квадратов предварительно построив элементарные кривые $Q = f_1(H)$, $\omega = f_2(H)$, $\upsilon = f_3(H)$.

2. Провести сравнительную оценку вычисленных расходов воды по уравнениям с измеренными расходами согласно прил. 3.

3. Освоить методики взаимоувязки элементарных кривых между собой, экстраполяции кривой расходов, составления рабочей таблицы для определения расходов воды по измеренным уровням.

Основными данными наблюдений, характеризующих водный режим рек, являются данные об уровнях H и расходах Q воды. Между расходами воды в створе реки и уровнями существует гидравлическая взаимосвязь сложного вида.

Если участок реки устойчив, уклон водной поверхности J с изменением уровня меняется незначительно и отсутствует подпор со стороны речных сооружений или притоков, то каждому значению расхода воды соответствует одно определенное значение уровня воды. Такая зависимость уровня от расхода называется *однозначной*. Однако в действительности однозначная зависимость встречается крайне редко, так как всегда имеются погрешности измерений расходов и уровней и влияние ряда причин, нарушающих их связь.

Кривые $Q = f(H)$ являются *временными*, когда связь устойчива в течение 1,5–2 лет, и *многолетними*, когда эта связь устойчива в течение длительного периода времени. Однозначная зависимость уровня от расхода может нарушаться за счет изменения уклона водной поверхности на подъеме и спаде паводка, в результате деформаций живого сечения русла реки, подпора, зарастаемости и изменения шероховатости русла и поймы. В таких условиях одному и тому же расходу в створе могут соответствовать различные уровни, например, на подъеме или спаде паводка. А зависимость уровня от расхода неоднозначна.

Связь между уровнями и расходами воды, выраженная графически, называется кривой расходов $Q = f(H)$. В гидрометрии определяют

зависимость расхода от уровня, хотя фактически независимой переменной является расход воды, а уровень – функцией. Так поступают на практике потому, что на гидрометрических постах расход Q определяют по измеренному уровню H , если связь $Q = f(H)$ заранее установлена. Это обусловлено еще и тем, что измерение уровней производят ежедневно в стандартные сроки, а измерение расходов, вследствие большой трудоемкости, производят значительно реже.

Кривые расходов широко применяются в различных гидравлических, гидрологических, водохозяйственных расчетах, например, в расчетах сопряжений бьефов гидротехнических сооружений, в гидрологических прогнозах и др. Кривая расходов является важнейшей гидравлической характеристикой речного потока и используется как в инженерной практике, так и в научных исследованиях.

Уровнем воды в створе реки называется высота водной поверхности относительно постоянной горизонтальной плоскости, называемой нулем графика водомерного поста. Нуль графика располагается примерно на 0,5 м ниже минимальной фактически наблюдавшейся самостоятельной отметки свободной поверхности воды, что позволяет избежать отрицательных значений H при их определении. Обычно уровни воды фиксируют в абсолютных отметках, что удобно при перенесении кривой на натуру. При обработке же данных, их величины выражают в условных отметках над нулем графика.

Для большинства равнинных рек, мало подверженных деформациям и зарастанию, для открытого русла характерна однозначная связь между расходом и уровнем.

Рассмотрим построение и экстраполяцию кривой расходов для беспойменных ярко выраженных русел. Практически определение зависимости между расходом и уровнем производится на основе полноценных данных наблюдений и связь эта является априори коррелятивной.

Кривая расходов $Q = f_1(H)$ строится в прямоугольной системе координат (рис. 1) совместно с кривой площадей живых сечений $\omega = f_2(H)$ и средних скоростей $v = f_3(H)$, так как расход при равномерном движении равен произведению площади живого сечения на среднюю скорость. Кривые площадей и средних скоростей нужны не только для анализа надежности измеренных расходов, но и для экстраполяции кривой расходов, т. е. продления ее за пределы данных наблюдений.

Масштаб для построения кривых выбирается таким образом, чтобы хорда, соединяющая концы кривой $Q = f_1(H)$, была расположена примерно под углом 45° к оси абсцисс, а для кривых $\omega = f_2(H)$ и $v = f_3(H)$ – под углом 60° . При выборе масштаба учитывают точность графического определения расходов воды, снимаемых с кривой для составления расчетной таблицы, а чтобы кривые не пересекались и не совмещались, нули шкал для параметров ω и v сдвигают вправо относительно нуля оси Q (рис. 1).

Элементарные кривые строят только для свободного состояния русла, а расходы зимнего периода и периода зарастания русла определяют с введением переходных коэффициентов.

Пример построения кривой расходов показан на рис. 1.

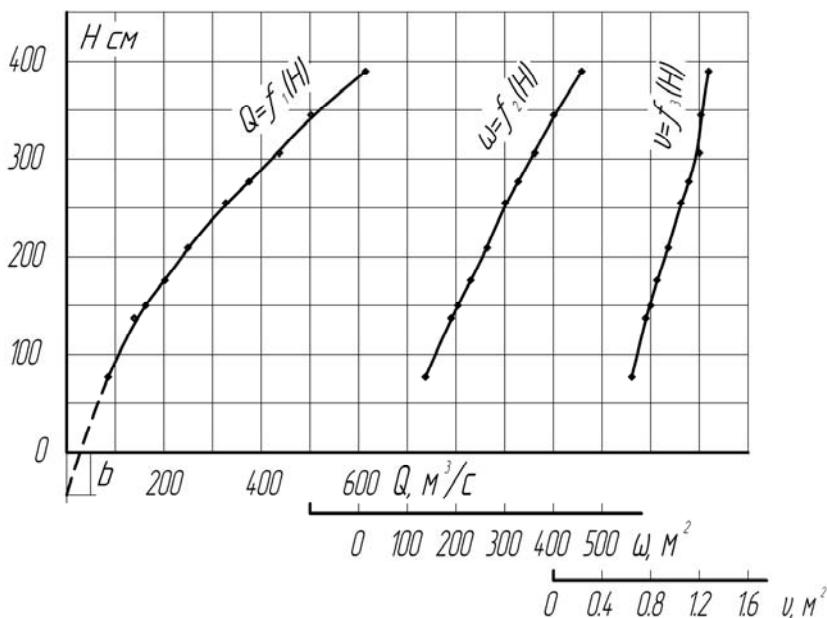


Рис. 1. Кривые зависимости $Q = f_1(H)$, $\omega = f_2(H)$, $v = f_3(H)$ р. Волги у г. Ржева

При ее построении частично использованы измеренные расходы воды р. Волги у г. Ржева, заимствованные из [1, 2]. Эти данные приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ расхода	Уровень над нулем графика, см	Расход воды Q , м ³ /с	Площадь живого сечения, ω , м ²	Средняя скорость течения, v , м/с	Ширина реки, b , м	Средняя глубина, h , м	Уклон водной поверхности, J , %
17	345	502	409	1,23	108	3,79	–
18	390	614	458	1,34	11	4,13	0,21
22	209	249	264	0,94	101	2,61	0,18
29	306	437	362	1,21	106	2,42	0,19
31	255	327	308	1,06	104	2,96	0,32
34	176	202	230	0,88	99,2	2,32	0,28
36	137	139	190	0,73	96,5	1,97	0,46
41	82	85,3	137	0,62	91,0	1,51	0,20
47	2,78	376	331	1,14	105	3,15	0,30
49	4,52	166	204	0,81	98,7	2,07	0,26

Значения ω получают по данным измерений глубины и нивелировки берегов выше уреза до отметок, превышающих многолетний уровень высоких вод.

При построении элементарных кривых общей осью является вертикальная ось H . В координатной системе (Q, H) , (ω, H) , (v, H) наносят на график точки измеренных Q , ω , v . Эти точки обычно располагаются с некоторым рассеиванием узкой полосой, обусловленным неизбежными погрешностями измерений и нарушением однозначности кривой расходов. Кривые проводят на глаз плавной линией с таким расчетом, чтобы каждая кривая занимала среднее положение относительно точек, т. е. по середине полосы рассеивания точек. Построение кривых начинается с проведения $\omega = f_2(H)$. Затем строится кривая средних скоростей $v = f_3(H)$ и кривая расходов $Q = f_1(H)$. При большой амплитуде изменения расходов ($Q_{\max} / Q_{\min} \geq 20$) нижнюю часть кривой расходов, примерно 20–30 % амплитуды уровней, вычерчивают в более крупном масштабе на том же чертеже.

Если из чертежа (рис. 1) видно, что точки Q , ω , ν тесно группируются около своих кривых или лежат на них ($Q = f_1(H)$ – выпуклая к оси H , $\omega = f_2(H)$ – почти прямая, $\nu = f_3(H)$ – слабо вогнутая к оси H), то это свидетельствует о правильности произведенных измерений и об отсутствии условий, нарушающих однозначность кривой расходов. После построения всех трех кривых производят их увязку между собой.

Взаимоувязка элементарных кривых состоит в том, что при однозначной связи каждому значению уровня должно соответствовать только одно значение расхода Q , равное произведению $\omega\nu$. Расхождения между расходом, вычисленным по произведению $\omega\nu$, и снятым с кривой $Q = f_1(H)$, должно быть не более 1,5 %. Если оно оказывается большим, то в соответствующем интервале производят исправление кривых, имея при этом в виду, что кривая площадей является наиболее точной из всех и исправлять необходимо кривые $Q = f_1(H)$ и $\nu = f_3(H)$. Для выполнения данной проверки и увязки кривых, амплитуду уровней разбивают на интервалы (примерно через 20 см) и при каждом значении уровня определяют произведение $\omega\nu$, и сравнивают его со значением измеренного расхода (табл. 1.2).

Таблица 1.2

H , см	Значения с кривой			$Q = \omega\nu$, м ³ /с	Расхождение, %
	Q , м ³ /с	ω , м/с	ν , м/с		
82	85,3	137	0,62	84,9	0,47
100	100	155	0,65	100,8	0,80
120	123	175	0,71	124	0,81
380	583	444	1,32	586	0,51
390	605	455	1,38	605	0

Данные табл. 1.2. свидетельствуют о правильности построения кривых.

Построение кривой расходов заканчивают проверкой найденной зависимости, заключающейся в определении отклонений в процентах измеренных расходов от расходов, полученных по кривой $Q = f_1(H)$ при одних и тех же уровнях воды. Вычисление отклонений производится согласно табл. 1.3.

Таблица 1.3

№ расхода	Измерение		Q_2 по кривой расходов, м ³ /с	$\Delta Q = Q_1 - Q_2$, м ³ /с	σ	$\Delta \sigma^2$
	H , см	Q_1 , м ³ /с				

Полученную зависимость $Q = f_1(H)$ считают хорошей, если средняя ошибка, вычисленная по формуле:

$$\sigma = 0,674 \sqrt{\frac{\sum (\Delta Q)^2}{n}}, \quad (1.1)$$

где n – сумма измеренных расходов;

$\sum (\Delta Q)^2$ – сумма квадратов отклонений в процентах, находится в пределах (2–4) %.

Такая кривая расходов используется для подсчета ежедневных расходов воды по наблюдаемым уровням. В этих целях составляют рабочую таблицу связи расходов с уровнями.

Рабочая таблица составляется по специальной форме, указанной в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Приращение, Q , м ³ /с	H , см	Расход, м ³ /с									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	200	235	237,5	240	242,5	245	247,5	250	252,5	255	257,5
	210	260									

Для этого с кривой снимаются значения расходов через интервалы уровней от 5 до 20 см, а промежуточные значения расходов через 1 см определяются прямолинейной интерполяцией между

расходами, снятыми с кривой. Величины интервалов уровня принимаются в зависимости от кривизны участков кривой расходов так, чтобы расходы, определяемые интерполяцией, отклонялись от кривой не более чем на 1,5 % в верхней части и 3 % в нижней. При этом приращение расходов ΔQ по отдельным интервалам уровня должно равномерно увеличиваться или оставаться постоянным с увеличением уровня. Такой фрагмент представлен данными таблицы 1.4, полученными с кривой расходов (рис. 2).

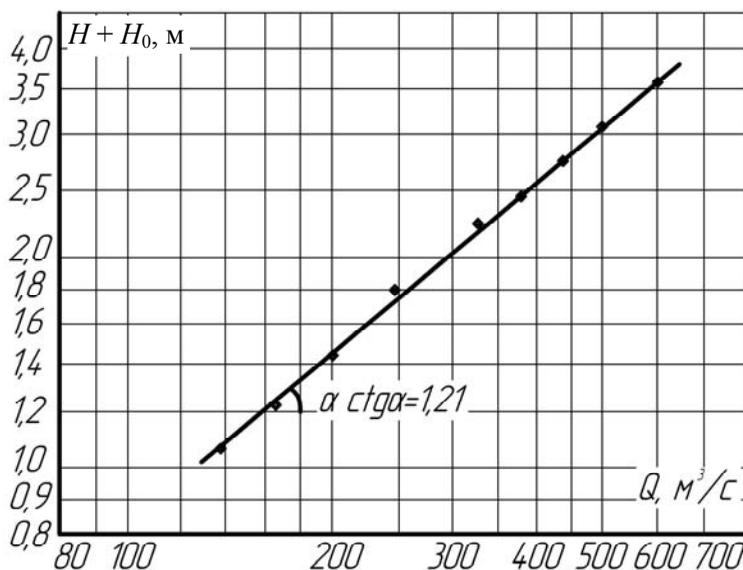


Рис. 2. Линейная анаморфоза кривой

Однозначную зависимость $Q = f_1(H)$ можно выразить аналитически (1.2; 1.3). Имеется несколько уравнений, выражающих эту связь. В. Г. Глушков предложил степенную формулу

$$Q = a(H + H_0)^m, \tag{1.2}$$

где H_0 – уровень воды при расходе $Q = 0$ может быть положительным или отрицательным в зависимости от отметки нуля графика;
 a, m – параметры уравнения.

Значения a , H_0 , m определяются по данным гидрометрических измерений различными способами. Наиболее простым из них является использование линейной анаморфозы функции (1.2). Для этого необходимо прологарифмировать выражение (1.2), и новый вид его представляет собой уравнение прямой:

$$\lg Q = \lg a + m \lg(H + H_0). \quad (1.3)$$

Следовательно, на логарифмической клетчатке функция (1.2) будет представлена прямой линией, по которой очень легко определяются значения параметров a , m . Но предварительно надо найти H_0 , что можно сделать графически или аналитически.

При графическом определении значение H_0 численно равно отрезку на вертикальной оси H кривой расходов при ее экстраполяции вниз до значения $Q = 0$ (рис. 2), где $H_0 = -0,30$ м.

Аналитически значение H_0 определяется по формуле (1.4)

$$H_0 = \frac{H_3^2 - H_1 \cdot H_2}{H_1 + H_2 - 2H_3}, \quad (1.4)$$

где H_1 , H_2 – уровни в нижней и верхней частях кривой $Q = f_1(H)$, соответствующие расходам Q_1 , Q_2 ;

H_3 – уровень, соответствующий расходу Q_3 на кривой расходов.

Расход Q_3 вычисляется по формуле (1.5)

$$Q_3 = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2}. \quad (1.5)$$

Для иллюстрации расчетов снимаем с кривой расходов (см. рис. 1) $Q_1 = 85,3$ м³/с, $H_1 = 0,82$ м, $Q_2 = 400$ м³/с, $H_2 = 2,88$ м, тогда $Q_3 = \sqrt{85,3 \cdot 400} = 185$ м³/с и соответствующий ему уровень 1,67 м, а значение H_0 , вычисленное по формуле (1.4), равно $-0,32$ м и практически совпадает со значением, определенным графическим путем. Затем строят на логарифмической клетчатке линейную анаморфозу (1.3) по всем точкам измеренных расходов и уровней на рис. 2.

Данные к ее построению заносят в табл. 1.5 с учетом $H_0 = -0,32$ м.

Полученное аналитическим путем уравнение кривой расходов считается удовлетворительным, если средняя вероятная ошибка, вычисленная по формуле (1.1), находится в пределах 2–4 %.

Экстраполяции кривых расходов

Экстраполяцией зависимости $Q = f_1(H)$ называется ее продолжение за пределы измеренных расходов для расчетов максимальных расходов при высоких проектных уровнях. Методика экстраполяционных вычислений зависит от полноты исходных данных. В основе экстраполяции по различным способам лежит предпосылка полной или частичной линейаризации $Q = f_1(H)$ или другой функции, связанной с рассматриваемой. Возможно также и непосредственная экстраполяция кривой расходов путем продолжения ее части обоснованной наблюдениями. Надёжной экстраполяцией считается, когда кривая расходов продлевается вверх до $0,2(H_{\max} - H_{\min})$.

Универсального способа экстраполяции нет из-за сложности движения воды в реках. Кратко рассмотрим способы, получившие наибольшее распространение.

Способ *графической экстраполяции* используют в том случае, когда продлевают кривую расходов вверх до 10 % амплитуды уровня, а вниз до 5 %. Сущность способа в том, что кривую графически продлевают до необходимого уровня по тенденции кривой, построенной на основании наблюдений. При этом профиль поперечного сечения не должен иметь резких переломов в пределах рассматриваемого участка реки, шероховатость берегов должна изменяться незначительно.

Экстраполяция по кривой $v = f_3(H)$.

В этом случае используется уравнение $Q = \omega v$. Кривая $\omega = f_2(H)$ не нуждается в экстраполяции, так как ω вычисляют при любом уровне. Экстраполируют лишь кривую $v = f_3(H)$ также по тенденции. В тех случаях, когда $v = f_3(H)$ имеет сложный вид и экстраполировать ее нельзя, строят дополнительно график связи $v = f_3(h)$. Последняя функция в верхней части зачастую близка к линейной, поэтому ее легко экстраполировать до необходимого уровня, предварительно вычисляя при разных H среднюю глубину $h = \omega/b$ (b – ширина реки в сечении по урезу).

Экстраполяция по уравнению равномерного движения $Q = \omega C \sqrt{RJ}$.

Для речных потоков при $b/h \geq 10$ можно принимать $R = h$.

В случае наличия измеренных уклонов водной поверхности J . Экстраполяция кривой расходов заключается в том, что расходы в экстраполируемой части вычисляют умножением площади живого сечения ω , определяемое по профилю сечения, на среднюю скорость течения, определяемую по формуле Шези $v = C \sqrt{RJ}$.

Величина h определяется по профилю створа, значения уклона J и коэффициента Шези C для экстраполируемого участка определяют построением и экстраполяцией кривых $J = f(H)$, $C = f(H)$.

Зависимость $J = f(H)$ строят по данным измерения уклонов, затем ее экстраполируют до требуемого высокого уровня непосредственно продолжением, как показано на рис. 3 – пунктирная линия.

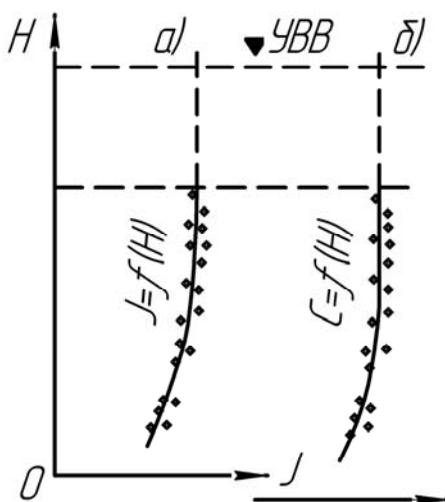


Рис. 3. Кривые $J = f(H)$ и $C = f(H)$ и их экстраполяция

Для построения кривой $C = f(H)$ по измеренным расходам вычисляют C по формуле $Q = \omega C \sqrt{RJ}$, затем экстраполируют кривую непосредственным продолжением до требуемого высокого уровня (рис. 3).

На реках со средними глубинами более 1–2 м в большинстве случаев кривые $J = f(H)$, $C = f(H)$ в верхних частях легко экстраполируются, а кривая $C = f(H)$ часто переходит в прямую, параллельную оси H , и $C = \text{const}$.

В тех случаях, когда $C = f(H)$ имеет сложный вид, что характерно для малых рек, проверяют возможность экстраполяции $C = f(h)$ и $C = f(J)$.

В случае отсутствия измеренных уклонов J можно пользоваться способом Стивенса, дающим хорошие результаты для рек со средней глубиной в паводок не менее 3,5–4,0 м и с движением воды, близким к равномерному, когда применима формула Шези. Способ основан на допущении $C\sqrt{J} = \text{const}$ для любых расходов, практика подтвердила данную предпосылку. Следовательно, расход есть функция выражения

$$Q = f(\omega\sqrt{h}), \quad (1.8)$$

и связь эта близка к линейной при равномерном движении, что видно из формулы Шези, если коэффициент шероховатости $n = \text{const}$. Практически же связь (1.8) переходит в линейную в верхней части кривой, поэтому кривую удобно экстраполировать. Если кривая (1.8) с незначительной кривизной, то ее экстраполируют по тенденции верхнего участка, обоснованного измерениями расхода, до значения $(\omega\sqrt{h})$ соответствующего расчетному уровню.

Практически экстраполяцию кривой расходов выполняют величины $(\omega\sqrt{h})$ и по ним строят график зависимости $Q = f(\omega\sqrt{h})$. На том же листе строят и кривую расходов. Ось абсцисс, на которой откладывают расходы, является общей для $Q = f(\omega\sqrt{h})$ и $Q = f(H)$. Масштаб шкалы $(\omega\sqrt{h})$ такой, чтобы кривая $Q = f(\omega\sqrt{h})$ располагалась ниже кривой $Q = f(H)$. Проекстрapolировав кривую $Q = f(H)$ до значения $Q = f(\omega\sqrt{h})$ (точка 1), получают

максимальный расход Q_{\max} на горизонтальной оси. Затем полученный таким образом Q_{\max} переносят графически вверх до пересечения с линией, способствующей максимальному уровню (точка 2). Точка 2 является искомой в зоне экстраполяции кривой расходов, через которую последнюю и проводят.

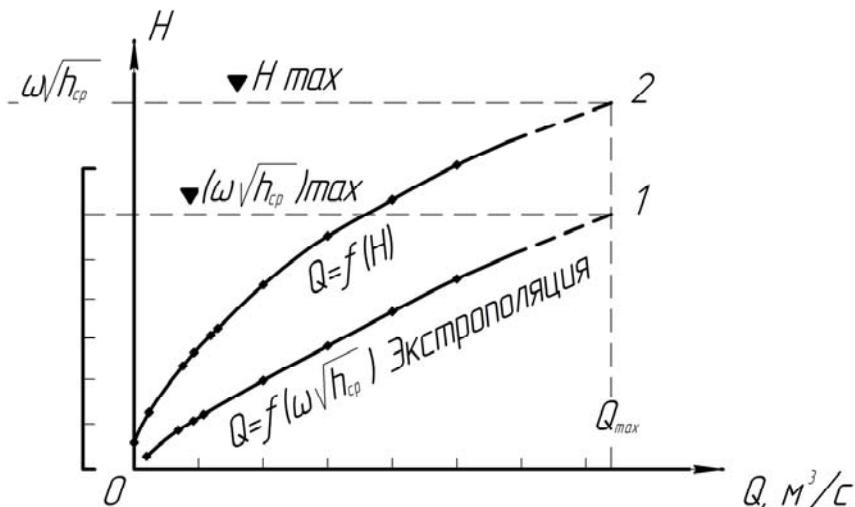


Рис. 4. Экстраполяция кривой расходов по способу Стивенса

Экстраполировать кривую расходов можно и по обоснованному уравнению

$$Q = a (H + H_0)^m.$$

Следует отметить, что экстраполяция кривых расходов для различных встречающихся в практике случаев подробно рассмотрена в «Пособии по экстраполяции кривых расходов воды до наивысших уровней».

ЗАДАНИЕ 2

Расчет и построение кривой обеспеченности (кривой распределения вероятностей превышения) гидрологических характеристик

Цель работы:

1. Освоить методы построения эмпирической и теоретической кривых распределения при выполнении гидрологических расчетов.
2. Построить по данным наблюдений (прил. 2) эмпирическую кривую обеспеченности расходов воды на клетчатке вероятностей.
3. Подобрать на основе эмпирической кривой обеспеченности теоретическую кривую распределения методами наибольшего правдоподобия, моментов и квантелей.
4. Учесть внутрирядную корреляцию при подборе теоретической кривой распределения по методу наибольшего правдоподобия.
5. Определить стандартные ошибки выборочной оценки параметров кривой распределения.
6. Вычислить значения расходов воды различной обеспеченности.

Гидрологические явления и гидрологические параметры этих явлений носят вероятностный характер, так как они зависят от многих одновременно действующих факторов переменных во времени. Гидрологические параметры характеризуются совокупностью возможных значений и вероятностью, с которой они могут появляться. Поэтому в гидрологических расчетах и исследованиях широкое применение нашли статистические методы, основанные на теории вероятностей и позволяющие количественно оценивать интегральное действие многих факторов в многофакторных явлениях и связях.

Для этих целей используют кривые распределения, по которым судят об изменчивости изучаемой величины во времени и устанавливают её значения, соответствующие определенной (например, нормативной) вероятности. С помощью кривых распределения экстраполируют пределы колебаний стока при ограниченном количестве наблюдений на более продолжительные периоды времени, выходящие за рамки наблюдений. Нормативную продолжительность расчетных периодов и расчетную обеспеченность P параметров стока принимают по действующим нормативным документам [3–6].

Поскольку расчетные периоды времени в большинстве случаев выходят за рамки наблюдений, то в расчетах приходится пользо-

ваться теоретическими кривыми распределения, подбираемыми на основе имеющихся данных наблюдений. Из теоретических кривых в гидрологии применяют кривые трехпараметрического гамма-распределения Крицкого и Менкеля и биномиальную кривую Пирсона III типа. После того, как теоретическая кривая распределения будет подобрана, расчетное значение стока Q_p вычисляют по формуле

$$Q_p = \bar{Q} \cdot K_p, \quad (2.1)$$

где P – расчетная обеспеченность (вероятность превышения);

K_p – переходный или модульный коэффициент, значение которого вычисляют по основным параметрам кривой распределения на основе данных наблюдений;

\bar{Q} – среднеарифметическое значение стока,

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (2.2)$$

где n – количество членов в ряду наблюдений;

Q_i – любой член статистического ряда наблюдений.

Подбор теоретических кривых распределения осуществляют по одному из трех методов: методу наибольшего правдоподобия, методу моментов и графоаналитическому (в целях усвоения материала подбираем кривую по всем трем методам). Графоаналитический метод часто называют методом квантелей.

Для подбора теоретической кривой распределения предварительно определяют, три параметра кривой:

1. Среднеарифметическое значение ряда \bar{Q} по формуле (2.2).

2. Коэффициент вариации (изменчивости) C_v , представляющий собой отношение среднего квадратического отклонения ряда к ее среднему значению

$$\tilde{C}_v = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}} = \sqrt{\frac{\sum^n (Q_i - \bar{Q})^2}{\bar{Q}^2 (n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum^n (K_i - 1)^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

где $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$ – модульный коэффициент;

σ_Q – среднее квадратическое отклонение ряда

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum^n (Q_i - \bar{Q})^2}{n-1}}. \quad (2.4)$$

3. Коэффициент асимметрии кривой C_s , характеризующий степень несимметричности кривой распределения относительно среднего значения \bar{Q}

$$\tilde{C}_s = \frac{\sum^n (Q_i - \bar{Q})^3}{n\sigma_Q^3} = \frac{n\sum^n (K_i - 1)^3}{\bar{C}_s^3 (n-1)(n-2)}. \quad (2.5)$$

Метод наибольшего правдоподобия. Метод разработан для трехпараметрического гамма-распределения.

Вначале вычисляют две математические статистики λ_2 и λ_3 .

$$\lambda_2 = \frac{\sum^n \lg K_i}{n-1}, \quad (2.6)$$

$$\lambda_3 = \frac{\sum^n K_i \lg K_i}{n-1}, \quad (2.7)$$

где $K_i = Q_i / \bar{Q}$ – модульный коэффициент или относительный расход воды. Расчеты рекомендуется выполнить в табличной форме, табл. 2.1.

Таблица 2.1

Год	Расход $Q_i, \text{м}^3/\text{с}$	K_i	$\lg K_i$	$K_i \lg K_i$

По вычисленным статистикам λ_2, λ_3 , используя соответствующие номограммы, определяют значения \check{C}_v и $\check{C}_s / \check{C}_v$. Пусть вычисленные по формулам $\lambda_2 = -0,0195$ и $\lambda_3 = 0,0185$, тогда $\check{C}_v = 0,29$, а $\check{C}_s / \check{C}_v = 1,25$, т. е. $\check{C}_s = 1,25 \check{C}_v$.

Однако значения коэффициентов \check{C}_s и \check{C}_v , получаемые по формулам (2.3) и (2.5), равно как и снимаемые с графиков не учитывают внутрирядную связь, т. е. корреляционную связь между стоком смежных лет. Поэтому полученные \check{C}_s и \check{C}_v корректируют с учетом указанной связи по формулам (2.8) и (2.9)

$$C_v = \left(a_1 + \frac{a_2}{n} \right) + \left(a_3 + \frac{a_4}{n} \right) C_v + \left(a_5 + \frac{a_6}{n} \right) C_v^2, \quad (2.8)$$

$$C_s = \left(b_1 + \frac{b_2}{n} \right) + \left(b_3 + \frac{b_4}{n} \right) C_v + \left(b_5 + \frac{b_6}{n} \right) C_v^2, \quad (2.9)$$

где $a_1 \dots a_6, b_1 \dots b_6$ – коэффициенты, определяемые по табл. 2.2 и 2.3 в зависимости от значения коэффициента корреляции r' внутрирядной связи и соотношения $\check{C}_s / \check{C}_v$.

Таблица 2.2

$\check{C}_s / \check{C}_v$	r'	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	34,15
	0,5	-0,02	3,47	1,18	-29,71	-0,41	58,08

Таблица 2.3

r'	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

Значение коэффициента r' определяется по формуле

$$r' = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_1)(Q_{i+1} - \bar{Q}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (Q_i - \bar{Q}_1)^2 \sum_{i=2}^n (Q_i - \bar{Q}_2)^2}}, \quad (2.10)$$

где $\bar{Q}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} Q_i}{n-1}$; $\bar{Q}_2 = \frac{\sum_{i=2}^n Q_i}{n-1}$, т. е. \bar{Q}_1 – среднее значение исходного ряда расходов без учета стока последнего года;

\bar{Q}_2 – среднее значение ряда расходов, образованного из исходного ряда путем смещения стока в ряду на 1 год вперед.

Далее, по установленным значениям кривой распределения \bar{Q} , $C_v, C_s/C_v$ выписываются из специальных математических таблиц (стр. 126–143 [5]) значения переходных коэффициентов K_p в диапазоне обеспеченностей 0,001–99,9 % и по формуле (2.1) вычисляются значения расходов. Далее определяются относительные средние квадратические ошибки статистических параметров:

1. Относительная средняя квадратическая ошибка средней многолетней величины ряда $\varepsilon_{\bar{Q}}$

$$\varepsilon_{\bar{Q}} = \frac{100C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1+r'}{1-r'}}. \quad (2.11)$$

2. Относительная средняя квадратическая ошибка коэффициента вариации ε_{C_v}

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{C_v}{n + 4C_v^2} \sqrt{\frac{n(1 + C_v^2)}{2}} \left(1 + \frac{3C_v^2 r'^2}{1 + r'} \right). \quad (2.12)$$

Эти ошибки для представительных рядов не должны превышать $\varepsilon_{\bar{Q}} \leq 5-10\%$, $\varepsilon_{C_v} \leq 10-15\%$.

Метод моментов. В связи с тем, что значение \check{C}_s , вычисляемое по формуле (2.5) при $n < 100$ лет, получается с большой ошибкой, \check{C}_s определяют из соотношения $\check{C}_s / \check{C}_v$ при котором теоретическая кривая обеспеченности, построенная на клетчатке вероятностей, совпадает в пределах наблюдений с эмпирической кривой обеспеченности (рис. 5). Поэтому обязательным элементом гидрологических расчетов является построение эмпирической кривой обеспеченности расходов в координатах K и P . Для этого полученный исходный ряд надо перестроить в убывающем порядке и эмпирическую обеспеченность P_i каждого K_i вычислить по формуле

$$P_i = \frac{m_i}{n + 1} 100\%, \quad (2.13)$$

где m_i – порядковый номер члена ряда, перестроенного в убывающем порядке;

n – количество членов в ряду.

Полученные точки (K_i, P_i) наносят на клетчатку вероятностей, (рис. 5) и по ним проводят сглаженную плавную осредняющую кривую.

Расчеты рекомендуется выполнять в табличной форме.

Таблица 2.4

№ п/п	Год	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	В убывающем порядке			$K_i - 1$		$(K - 1)^2$	$(K - 1)^3$		$P = m/(n + 1) \cdot 100\%$
			год	$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	$K_i = Q_i/Q$	+	-		+	-	

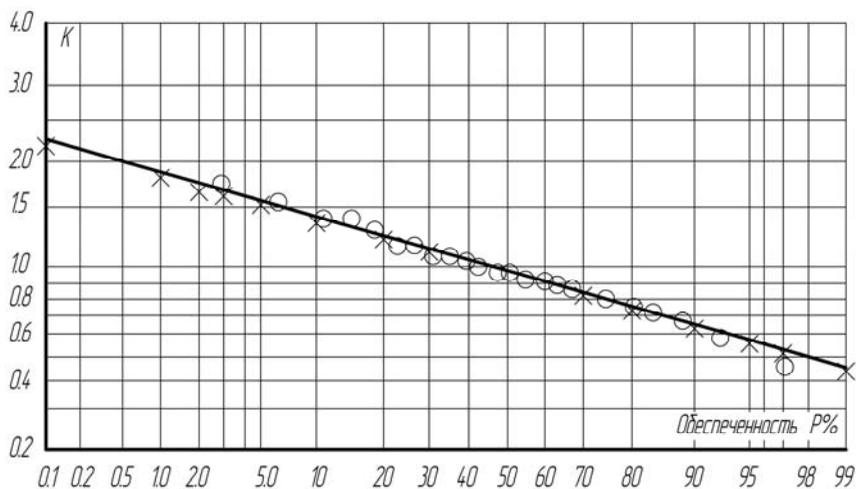


Рис. 5. Кривая обеспеченности:
 o – эмпирические точки; x – теоретические точки

Для подбора и построения теоретической кривой обеспеченности, необходимо рассчитать ее координаты. Точки с полученными координатами нанести на клетчатку вероятностей, с эмпирической кривой, рис. 5. Ординаты теоретической кривой, т. е. K_p вычисляются по формуле (2.14).

$$K_p = C_v \cdot \Phi_{(P, C_s)} + 1, \quad (2.14)$$

где C_v – коэффициент вариации, определяемый по формуле (2.3);

$\Phi_{(P, C_s)}$ – отклонение ординаты кривой обеспеченности от середины, при $C_v = 1$, определяют по таблице Фостера-Рыбкина в зависимости от обеспеченности P и коэффициента асимметрии C_s (табл. 2.5).

C _s	Нормированные отклонения Φ при обеспеченности P, %																	S
	0,01	0,1	1	3	5	10	20	25	30	50	70	80	90	95	97			
0,00	3,72	3,09	2,33	1,88	1,64	1,28	0,84	0,67	0,52	0,00	-0,52	-0,84	-1,28	-1,64	-1,88	0,00		
0,10	3,94	3,23	2,40	1,92	1,67	1,29	0,84	0,66	0,51	-0,02	-0,53	-0,85	-1,27	-1,61	-1,84	0,03		
0,20	4,16	3,33	2,47	1,96	1,70	1,30	0,83	0,65	0,50	-0,03	-0,55	-0,85	-1,26	-1,58	-1,79	0,06		
0,30	4,38	3,52	2,54	2,00	1,72	1,31	0,82	0,64	0,48	-0,05	-0,56	-0,85	-1,24	-1,55	-1,75	0,08		
0,40	4,61	3,66	2,61	2,04	1,75	1,32	0,82	0,63	0,47	-0,07	-0,57	-0,85	-1,23	-1,52	-1,70	0,11		
0,50	4,83	3,81	2,68	2,08	1,77	1,32	0,81	0,62	0,46	-0,08	-0,58	-0,85	-1,22	-1,49	-1,66	0,14		
0,60	5,05	3,96	2,75	2,12	1,80	1,33	0,80	0,61	0,44	-0,10	-0,59	-0,85	-1,20	-1,45	-1,61	0,17		
0,70	5,25	4,10	2,82	2,15	1,82	1,33	0,79	0,59	0,43	-0,12	-0,60	-0,85	-1,18	-1,42	-1,57	0,20		
0,80	5,50	4,24	2,89	2,18	1,84	1,34	0,78	0,58	0,41	-0,13	-0,60	-0,85	-1,17	-1,38	-1,52	0,22		
0,90	5,73	4,38	2,96	2,22	1,86	1,34	0,77	0,57	0,40	-0,15	-0,61	-0,85	-1,15	-1,35	-1,47	0,25		
1,00	5,96	4,53	3,02	2,25	1,88	1,34	0,76	0,55	0,38	-0,16	-0,62	-0,85	-1,13	-1,32	-1,42	0,28		
1,10	6,18	4,67	3,09	2,28	1,89	1,34	0,74	0,54	0,36	-0,18	-0,62	-0,85	-1,10	-1,28	-1,38	0,31		
1,20	6,41	4,81	3,15	2,31	1,91	1,34	0,73	0,52	0,35	-0,19	-0,63	-0,84	-1,08	-1,24	-1,33	0,34		
1,30	6,64	4,95	3,21	2,34	1,92	1,34	0,72	0,51	0,33	-0,21	-0,63	-0,84	-1,06	-1,20	-1,28	0,37		
1,40	6,87	5,09	3,27	2,37	1,94	1,34	0,71	0,49	0,31	-0,22	-0,64	-0,83	-1,04	-1,17	-1,23	0,39		
1,50	7,09	5,23	3,33	2,39	1,95	1,33	0,69	0,47	0,30	-0,24	-0,64	-0,82	-1,02	-1,13	-1,19	0,42		
1,60	7,31	5,37	3,39	2,42	1,96	1,33	0,68	0,46	0,28	-0,25	-0,64	-0,81	-0,99	-1,10	-1,14	0,45		
1,70	7,54	5,50	3,44	2,44	1,97	1,32	0,66	0,44	0,26	-0,27	-0,64	-0,81	-0,97	-1,06	-1,10	0,48		
1,80	7,76	5,64	3,50	2,46	1,98	1,32	0,64	0,42	0,24	-0,28	-0,64	-0,80	-0,94	-1,02	-1,06	0,51		
1,90	7,98	5,77	3,55	2,49	1,99	1,31	0,63	0,40	0,22	-0,29	-0,64	-0,79	-0,92	-0,98	-1,01	0,54		
2,00	8,21	5,91	3,60	2,51	2,00	1,30	0,61	0,39	0,20	-0,31	-0,64	-0,78	-0,90	-0,95	-0,97	0,57		
2,10	-	6,04	3,65	2,53	2,01	1,29	0,59	0,37	0,18	-0,32	-0,64	-0,76	-0,86	-0,91	-0,93	0,59		

Расчет координат теоретической кривой обеспеченности рекомендуется выполнять табличным способом (табл. 2.6), начиная с соотношения $C_s / C_v = 2$.

Таблица 2.6

P, %		0,01	0,1	0,5	1	2	3	5	10	20	25	30	50	70	75	80	90	95	97
$C_s / C_v = 2$	Φ																		
	$\Phi \cdot C_v$																		
	$K_p = \Phi \cdot C_v + 1$																		

Если проведенная по теоретическим точкам кривая совпадает с эмпирической, то она является правильно подобранной и используя её значения K_p по формуле (2.1) вычисляют расходы воды необходимой обеспеченности. Если кривые не согласуются, то изменяют соотношение C_s / C_v и расчеты повторяют, добиваясь совпадения обеих кривых.

Нормативная или расчетная обеспеченность для минимальных расходов принимается в зависимости от требуемой степени бесперебойности в подаче воды той или иной отрасли экономики и находится в пределах $P = 80-97$ %. Расчетная обеспеченность максимальных расходов при проектировании гидротехнических и транспортных сооружений принимается в зависимости от класса капитальности сооружений $P = 0,01-3$ %.

Следует отметить, что метод моментов предполагает использование не только таблицы биномиального распределения, но и таблицы трехпараметрического гамма-распределения.

Графоаналитический метод. Разработан применительно к биномиальной кривой распределения и является наиболее простым из имеющихся методов подбора теоретических кривых. В его основе лежит предпосылка, что теоретическая кривая обеспеченности соответствует эмпирической, если она проходит через три опорные точки эмпирической кривой, которые отвечают обеспеченностям 5 %, 50 % и 95 %.

На клетчатке вероятностей строится эмпирическая кривая обеспеченности расходов Q (можно – модульных коэффициентов K_i) так же, как и по методу моментов. С этой кривой снимают расходы Q_i (или модульные коэффициенты K_i) обеспеченностью 5 %, 50 %, 95 % для вычисления коэффициента скошенности S кривой

$$S = \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{Q_5 - Q_{95}} = \frac{K_5 + K_{95} - 2K_{50}}{K_5 - K_{95}}. \quad (2.15)$$

Коэффициент S характеризует несимметричность кривой распределения вероятностей и функционально связан с коэффициентом асимметрии C_s . Зная S по табл. 2.5 выбирают значения C_s , т. е. определяют один из нескольких параметров теоретической кривой обеспеченности. Затем вычисляют среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_Q = \frac{Q_5 - Q_{95}}{\Phi_5 - \Phi_{95}}, \quad (2.16)$$

средний расход

$$\bar{Q} = Q_{50} - \Phi_{50} \cdot \sigma_Q \quad (2.17)$$

и наконец, значение третьего параметра кривой C_v

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{\bar{Q}}. \quad (2.18)$$

Определением \bar{Q} , C_v , C_s заканчивается подбор основных параметров теоретической кривой по графоаналитическому методу. Далее теоретическая кривая обеспеченности методически строится точно также, как и по методу моментов.

ЗАДАНИЕ 3

Приведение параметров кривой распределения гидрологических характеристик к многолетнему периоду

Цель работы:

1. Освоить методы приведения параметров кривой распределения к многолетнему периоду.
2. Освоить аналитический метод приведения параметров на основе линейной корреляции, для чего необходимо предварительно:
 - вычислить значение коэффициента корреляции;
 - вычислить параметры уравнений регрессии, составить уравнения регрессии и построить линии регрессии (рис. 6);
 - произвести оценку точности вычислений по одному из уравнений регрессии;
 - удлинить короткий ряд наблюдений по уравнению регрессии по данным реки-аналога;
 - определить значения параметров кривой распределения, приведенные к многолетнему периоду – \bar{Q}_N , C_{0N} .

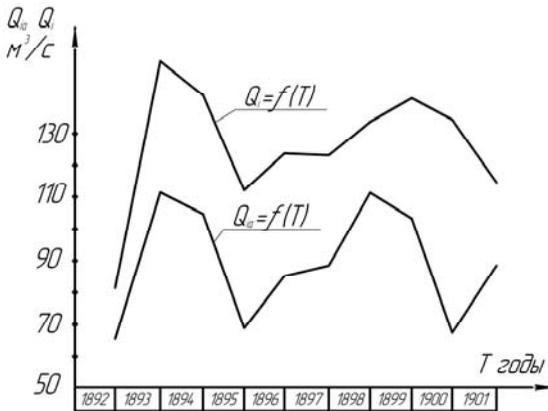


Рис. 6. Хронологический график колебаний растворов в расчетном створе и в створе реки-аналога

3. Определить значения \bar{Q}_N и C_{0N} графоаналитическим методом.

При коротких гидрологических рядах наблюдений $n < 10-15$ лет параметры кривой распределения получаются с большими ошибками.

ми $\varepsilon_Q > 10\%$, $\varepsilon_{C_v} > 15\%$, которые значительно превышают нормативные значения. Поэтому вычисленные по коротким рядам параметры \bar{Q}_n и C_{v_n} необходимо привести к многолетнему периоду $N > n$ и получить значения \bar{Q}_N и C_{v_N} , опираясь на данные наблюдений подобранной реки-аналога с длительным рядом наблюдений. Для различных климатических зон должно быть $N > 25-50$ лет, при этом меньший предел – для зоны достаточного увлажнения и больший – для засушливой. Затем, используя рассмотренные в задании 2 методы, рассчитывают значения расчетных расходов Q_{pN} по формуле (2.1). Недостающий же третий параметр C_s устанавливают как средний для группы рек-аналогов.

Можно также исходный короткий ряд n удлинить и по данным реки-аналога и далее по удлиненному ряду N получить искомое расчетное значение расхода Q_{pN} также по формуле (2.1), применяя методы, изученные в задании 2.

В обоих указанных вариантах решения задачи используют корреляционные связи между стоком в расчетном створе и в створе реки-аналога за период параллельных наблюдений n лет. Во многих случаях такие связи являются линейными и представляют собой уравнения регрессии (на графиках – линии регрессии).

Параметры кривой распределения для короткого ряда можно приводить к многолетнему периоду N аналитическим и графоаналитическим методами.

Подбор реки-аналога осуществляется обеспечением следующих основных условий и требований: бассейн реки-аналога с длинным рядом наблюдений N по физико-географическим условиям должен примерно соответствовать изучаемой реке или принадлежать к одному гидрологическому району, т. е. климатические факторы стока (осадки, испарение, влажность, температура, ветер) и факторы подстилающей поверхности (озерность, заболоченность, залесенность, категория рельефа, почвы и грунты) не должны значительно отличаться; отношение площадей водосборов не должно превышать 10 раз; должна соблюдаться синхронность колебаний стока в обоих створах, которая устанавливается по хронологическим графикам колебаний стока (рис. 6) или по суммарным разностным кривым $\sum(K_i - 1)_p = f(t)$, где t – время; значение коэффициента корреляции $r \geq 0,8$.

В настоящей работе река-аналог дается заранее подобранной из прил. 3 в виде ряда расходов Q_{ia} , а рис. 6, 7 выполняются отдельно на миллиметровой бумаге (допускается компьютерный вариант).

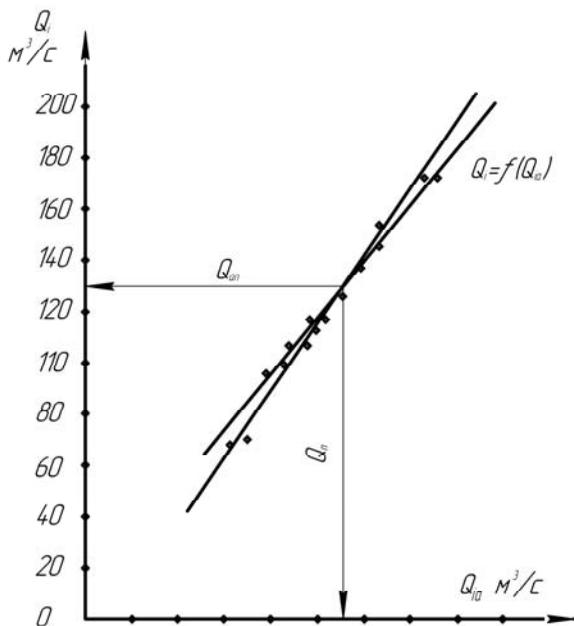


Рис. 7. График линий регрессии расходов в расчетном створе реки-аналога

Коэффициент корреляции определяется по формуле

$$r = \frac{\sum(Q_i - \bar{Q}_n)(Q_{ia} - \bar{Q}_{an})}{\sqrt{\sum(Q_i - \bar{Q}_n)^2 \sum(Q_{ia} - \bar{Q}_{an})^2}}, \quad (3.1)$$

где Q_i , Q_{ia} – соответственные значения расходов воды в расчетном створе и в створе реки-аналога за период параллельных наблюдений n лет;

\bar{Q}_n , \bar{Q}_{an} – средние значения расходов в обоих створах за n лет,

$$\bar{Q} = \frac{\sum^n Q_i}{n}, \text{ м}^3/\text{с}; \quad \bar{Q}_{an} = \frac{\sum^n Q_{ia}}{n}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Вспомогательные расчеты рекомендуется произвести в табличной форме.

Таблица 3.1

№ п/п	Го- ды	Q_{ia}	Q_i	$Q_{ia} - \bar{Q}_{an}$	$Q_i - \bar{Q}_n$	$(Q_{ia} - \bar{Q}_{an})^2$	$(Q_i - \bar{Q}_n)^2$	$(Q_{ia} - \bar{Q}_{an}) \times$ $\times (Q_i - \bar{Q}_n)$	$Q_{ia} - \bar{Q}_{an}$	$(Q_{ia} - \bar{Q}_{an})^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		\sum^n	\sum^n			\sum^n	\sum^n	\sum^n		\sum^n

Средняя квадратическая ошибка коэффициента корреляции вычисляется по формуле

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (3.2)$$

При $n < 20$ лет вычисляют коэффициент достоверности K_D , значение которого должно быть $K_D > 3$.

$$K_D = \frac{|r|\sqrt{n-1}}{1-r^2}. \quad (3.3)$$

Аналитический метод. В этом методе используют известные линейные уравнения регрессии, записываемые применительно к расходам воды в виде

$$Q_{i\text{cp}} = \bar{Q}_n + r \frac{\sigma_{Q_n}}{\sigma_{Q_{an}}} (Q_{ia} - \bar{Q}_{an}), \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.4)$$

$$Q_{iacp} = \bar{Q}_{an} + r \frac{\sigma_{Qan}}{\sigma_{Qn}} (Q_i - \bar{Q}_n), \text{ м}^3/\text{с} \quad (3.5)$$

где σ_{Qn} и σ_{Qan} – среднеквадратические отклонения рядов расходов, определяемые по формулам

$$\sigma_{Qn} = \sqrt{\frac{\sum^n (Q_i - \bar{Q}_n)^2}{n-1}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_{Qan} = \sqrt{\frac{\sum^n (Q_{ia} - \bar{Q}_{an})^2}{n-1}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.7)$$

В уравнения (3.4) и (3.5) подставляются численные значения всех постоянных и затем по ним строятся линии регрессии $Q(Q_a)$ и $Q_a(Q)$ на графике (рис. 7), задавая при этом значениями расходов сначала в створе реки-аналога (3.4), а затем в расчетном створе (3.5).

Один из параметров кривой распределения, приведенный к многолетнему периоду, \bar{Q}_N вычисляются по уравнению регрессии, записываемому в виде

$$\bar{Q}_N = \bar{Q}_n + r \frac{\sigma_N}{\sigma_{aN}} (\bar{Q}_{aN} - \bar{Q}_{an}), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.8)$$

где \bar{Q}_{aN} – среднее значение расхода длинного ряда реки-аналога,

$$\bar{Q}_{aN} = \frac{\sum^N Q_{ia}}{N}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.9)$$

σ_{QaN} – среднеквадратическое отклонение длинного ряда расходов реки-аналога

$$\sigma_{Q_{aN}} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{ia}^N Q_{ia} - \bar{Q}_{aN}\right)^2}{N-1}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.10)$$

σ_{Q_N} – среднеквадратическое отклонение ряда расходов в расчетном створе, приведенное к многолетнему периоду N вычисляется по формуле

$$\sigma_{Q_N} = \frac{\sigma_{Q_n}}{\sqrt{1-r^2\left(1-\sigma_{Q_{an}}^2/\sigma_{Q_{aN}}^2\right)}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.11)$$

Второй параметр C_{vN} , приведенный к многолетнему периоду, определяется по формуле

$$C_{vN} = \frac{\sigma_{Q_N}}{\bar{Q}_N}. \quad (3.12)$$

Графоаналитический метод. Строится график связи между расходами воды в обоих створах (рис. 7). Линия связи проводится визуально как осредняющая точка (здесь можно за линию связи принять построенную линию регрессии $Q(Q_a)$ по уравнению (3.4)). На горизонтальной оси графика откладывают значение среднего расхода реки-аналога \bar{Q}_{aN} проводится из этой точки вертикаль до пересечения с линией связи, из точки пересечения проводится горизонтальная линия до пересечения с вертикальной осью расходов. Отсекаемый этой линией на вертикальной оси отрезок есть искомый расход в расчетном створе \bar{Q}_N приведенный к многолетнему периоду.

Значение коэффициента вариации C_{vN} расчетном створе получают по формуле

$$C_{vN} = C_{vaN} \cdot \operatorname{tg} \alpha \frac{\bar{Q}_{aN}}{\bar{Q}_N}, \quad (3.13)$$

где α – угол наклона линии связи к оси расходов реки-аналога при одинаковом масштабе на осях координат;

$C_{\alpha aN}$ – коэффициент вариации ряда расходов реки-аналога, который вычисляется по формуле

$$C_{\alpha aN} = \frac{\sigma_{QaN}}{\bar{Q}_{an}}. \quad (3.14)$$

Удлинение хронологического ряда расходов. Удлинение хронологического ряда расходов или вычисление расходов в расчетном створе за конкретный год под номером i можно производить аналитически по уравнению (3.4) или по графику связи (рис. 7), подставляя в уравнение или откладывая на горизонтальной оси расход реки-аналога за тот же год i .

В заключение задания 3 необходимо удлинить исходный короткий ряд в расчетном створе и вычислить по уравнению (3.4) 3...5 расходов в расчетном створе за годы с имеющимися данными наблюдений с определением относительных отклонений расходов % по выражению

$$\Delta Q = \frac{Q_i - Q_{i\text{выч}}}{Q_i} \cdot 100 \%, \quad (3.15)$$

где $Q_{i\text{выч}}$ – вычисленный по уравнению (3.4) расход на основе расхода реки-аналога за тот же год.

В учебнике [5] материал по заданию 3, стр. 158...160, 197...199.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – Т.5, ч. II: Основные гидрологические характеристики. – 622 с.
2. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – Т.5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. – 432 с.
3. ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения.
4. Определение расчетных гидрологических характеристик: СНиП 2.01.14-83. – М., 1983. – 36 с.
5. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. – Л., 1984. – 448 с.
6. Определение гидрологических характеристик: пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83. – Минск, 2000. – 174 с.
7. Автомобильные дороги. Нормы проектирования: ТКП 45-3.03-19-2006. – Минске, 2006. – 42 с.
8. Мелиоративные системы и сооружения. Нормы проектирования: ТКП 45-3.04-8-2005. – Минск, 2006. – 105 с.
9. Проектирование местных автомобильных дорог низших категорий: пособие П1-2001 к СНиП 2.05.02-85. – Минск, 2001. – 8 с.
10. Проектирование и строительство малых ГЭС: пособие П1-04 к СНиП 2.06.01-86. – Минск, 2005. – 124 с.
11. Проектирование и возведение мелиоративных систем и сооружений: пособие П1-98 к СНиП 2.06.03-85. – Минск, 1999. – 86 с.
12. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования: СНиП 2.06-01-86. – М., 1987. – 32 с.
13. Мосты и трубы: СНиП 2-05.03-84. – М., 1988. – 200 с.
14. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения: СНиП 2-04.02-84. – М., 1996. – 128 с.
15. Рождественский, А. В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик / А. В. Рождественский. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 270 с.
16. Крицкий, С. Н. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами / С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель. – М.: Наука, 1982. – 272 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Данные к построению кривой расходов

Варианты											
0 р. Западная Двина г. Витебск				1 р. Сож г. Гомель				2 р. Днепр г. Орша			
H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с
0,48	53,9	83,2	0,42	0,58	110	301	0,37	0,46	32,8	106	0,31
0,70	65,5	110	0,50	0,98	141	389	0,36	0,68	48,3	122	0,40
0,88	82,5	126	0,56	1,25	164	442	0,37	0,93	75,2	148	0,51
1,16	82,7	158	0,64	2,74	537	1560	0,34	1,27	114	178	0,64
1,34	125	186	0,67	1,64	301	708	0,43	1,56	152	213	0,71
1,76	175	230	0,76	0,75	177	421	0,42	2,16	225	264	0,85
2,27	224	299	0,75	5,22	2610	2340	1,12	2,65	290	333	0,87
2,85	340	361	0,94	4,14	1270	2030	0,63	3,34	401	416	0,96
3,44	463	461	1,00	3,24	618	1730	0,37	4,34	568	539	1,05
3,78	535	509	1,05	0,38	123	334	0,37	5,56	782	680	1,15

Варианты											
3 р. Молога п. Спас-Забережье				4 р. Западная Двина г. Витебск				5 р. Молога г. Устюжна			
H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с
6,39	712	872	0,82	0,59	56,3	89,9	0,54	5,98	860	987	0,87
6,10	641	810	0,79	0,80	59,2	112	0,61	5,91	841	969	0,87
5,62	539	718	0,75	0,99	88,3	129	0,68	5,67	775	919	0,84
4,68	397	561	0,71	1,19	110	157	0,70	5,34	682	851	0,80
3,34	236	343	0,60	1,53	139	203	0,68	4,82	531	743	0,71
2,27	132	259	0,51	1,76	175	230	0,76	3,97	363	565	0,64
1,62	82,3	183	0,45	2,27	224	299	0,86	3,07	198	394	0,50
1,13	42,3	132	0,32	2,72	324	359	0,90	2,42	116	274	0,42
0,69	18,4	93	0,20	3,38	448	465	0,96	2,18	86,4	230	0,38
0,57	13,3	78,2	0,17	3,44	463	461	1,00	1,70	36,9	149	0,25

Варианты							
6 р. Днепр г. Орша				7 р. Неман п. Барштонас			
H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с
052	38,2	110	0,35	0,04	139,3	172	0,81
0,76	54,9	130	0,42	0,21	166	169	0,99
0,94	75,3	151	0,50	0,57	208	237	0,88
1,24	104	179	0,58	0,88	250	259	0,97
1,56	152	213	0,71	0,96	271	286	0,95
2,21	235	286	0,82	1,12	332	295	1,13
2,91	342	353	0,97	1,43	356	362	0,98
3,72	474	459	1,03	1,67	439	387	1,14
4,74	630	580	1,09	2,30	610	489	1,25
				3,54	1078	698	1,56

Варианты							
8 р. Молога п. Спас-Забережье				9 р. Днепр г. Орша			
H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с	H , м	Q , м ³ /с	ω , м ²	v , м/с
6,39	712	872	0,82	0,60	41,4	114	0,36
6,09	620	813	0,76	0,76	57,1	132	0,43
5,69	5,64	732	0,77	0,99	81,1	153	0,53
5,22	469	631	0,74	1,25	112	175	0,64
4,68	397	561	0,71	1,57	152	207	0,73
4,22	332	501	0,66	2,35	263	290	0,91
2,80	185	324	0,57	2,91	342	353	0,97
2,08	119	237	0,50	3,81	476	470	1,01
1,13	42,3	132	0,32	4,74	630	580	1,09
0,69	18,4	93	0,20	5,56	782	680	1,15

Приложение 2

Данные к выполнению задания 2

№ пп	Варианты									
	0		1		2		3		4	
	р. Западная Двина, г. Витебск		р. Сож, г. Гомель		р. Березина, г. Бобруйск		р. Днепр, г. Речица		р. Припять, г. Мозырь	
	Год	Q	Год	Q	Год	Q	Год	Q	Год	Q
1	1877	1850	1900	201	1900	114	1895	2540	1881	1120
2	78	2960	01	155	01	102	96	2330	82	700
3	79	2310	02	246	02	138	94	2360	83	2450
4	1880	1550	03	185	03	141	98	1360	84	1340
5	81	1780	04	135	04	101	99	1190	85	632
6	82	1190	05	220	05	130	1900	3480	86	2990
7	83	1840	06	216	06	129	01	2360	87	855
8	84	1750	07	258	07	130	02	1980	88	5100
9	1885	1230	08	308	08	136	03	1830	89	4620
10	86	1320	09	239	09	109	04	1560	1890	1820
11	87	1350	1910	186	1910	124	05	3130	91	1620
12	88	1530	11	171	11	99	06	1600	92	1120
13	89	1740	12	231	12	140	07	4170	93	1200
14	1890	598	13	149	13	126	08	3820	94	836
15	91	1740	14	157	14	108	09	1880	95	5670
16	92	1860	15	255	15	97	1910	1100	96	1630
17	93	950	16	302	16	147	11	1830	97	1350
18	94	1250	17	356	17	152	12	2130	98	1080
19	95	2380	18	207	18	67	13	1120	99	573
20	96	2160	19	218	1922	117	14	1230	1900	2330
21	97	1740	1920	159	23	114	15	4170	01	429
22	98	1210	21	97	24	133	16	4600	02	927
23	99	1630	22	216	25	88	17	4340	03	1140
24	1900	1900	23	152	26	113	18	2000	04	484
25	01	2390	24	208	27	131	19	2180	05	1180

№ пп	Варианты									
	5		6		7		8		9	
	р. Днепр г. Орша		р. Зап. Двина г. Витебск		р. Сож г. Гомель		р. Березина г. Бобруйск		р. Днепр г. Орша	
	Год	Q	Год	Q	Год	Q	Год	Q	Год	Q
1	1881	1120	1901	2390	1911	171	1911	99	1920	659
2	82	464	02	1310	12	231	12	140	21	499
3	83	1280	03	1310	13	149	13	126	22	1180
4	84	1080	04	1570	14	157	14	108	25	428
5	85	879	05	2080	15	255	15	97	26	1120
6	86	811	06	1720	16	302	16	147	27	602
7	87	616	07	2240	17	356	17	152	28	789
8	88	967	08	2360	18	207	1921	67	29	1650
9	89	1200	09	2140	19	218	22	117	1930	355
10	1890	414	1910	1180	1920	159	23	114	31	2000
11	91	1040	11	1610	21	97	24	133	32	907
12	92	752	12	1050	22	216	25	88	33	673
13	93	551	13	1440	23	152	26	113	34	677
14	94	783	14	1120	24	208	27	131	35	1110
15	95	1420	15	2080	25	97	28	144	36	800
16	96	1250	16	2180	26	231	29	105	37	805
17	97	1070	17	2350	27	250	1930	100	38	1100
18	98	713	18	1910	28	271	31	165	39	487
19	99	895	19	1860	29	245	32	155	1940	1260
20	1900	1160	1920	1310	1930	143	33	165	41	1210
21	01	1360	21	758	31	289	34	123	1945	674
22	02	756	22	1860	32	291	35	118	46	750
23	03	736	23	1310	33	407	36	119	47	1410
24	04	747	24	1910	34	224	37	100	48	770
25	05	1030	25	837	35	222	38	100	49	882

Данные к выполнению задания 3

№ п/п	Варианты											
	0			1			2			3		
	р. Западная Двина			р. Днепр			р. Днепр			р. Сож		
	Год	Витебск Q_i	Даугавпилс Q_{ia}	Год	Кременчуг Q_{ia}	Киев Q_i	Год	Орша Q_{ia}	Смоленск Q_i	Год	Гомель Q_{ia}	Славгород Q_i
1	1946	202	434	1899	1100	1040	1945	100	83	1945	212	91
2	47	243	430	1900	1480	1360	46	103	85	46	174	88
3	48	200	418	01	1150	1080	47	171	128	47	214	124
4	49	196	385	02	1530	1510	48	110	82	48	171	184
5	1950	259	512	03	1400	1340	49	116	90	49	149	92
6	51	178	401	04	960	906	1950	105	91	1950	118	67
7	52	233	451	05	1590	1480	51	120	94	51	186	92
8	53	350	630	06	1820	1690	52	134	116	52	151	92
9	54	171	361	07	1890	1690	53	169	129	53	260	135
10	55	235	521	08	1950	1840	54	95	83	54	133	78
11	56	270	592	09	1500	1400	55	121	100	55	154	83
12	57	296	600	1910	1060	1030	56	144	108	56	241	137
13	58	324	624	11	1130	1050	57	127	111	57	192	102
14	59	202	413	12	1600	1560	58	194	153	58	–	167
15	1960	186	353	13	1590	1490	59	101	80	59	–	78
16	61	–	415	14	1490	1390	1960	96	–	1960	–	83
17	62	–	721	15	1560	–	61	116	–	61	–	85
18	63	–	330	16	1840	–	62	211	–	62	–	158
19	64	–	276	17	2070	–	63	97	–	63	–	93
20	65	–	389	18	1160	–	64	92	–	64	–	90
21	66	–	467	19	1700	–	65	76	–	65	–	76
22	67	–	357	1920	1280	–	66	118	–	66	–	101
23	68	–	407	21	633	–	67	100	–	67	–	100
24	69	–	287	22	1540	–	68	101	–	68	–	81
25	1970	–	488	23	1580	–	69	97	–	69	–	87

№ п/п	Варианты								
	4			5			6		
	р. Днепр			р. Днепр			р. Неман		
	Год	Орша Q_{ia}	Жлобин Q_i	Год	Смоленск Q_{ia}	Надежда Q_i	Год	Гродно Q_{ia}	Белица Q_i
1	1945	100	155	1946	85	22	1945	221	143
2	46	103	118	47	128	37	46	223	137
3	47	171	262	48	82	22	47	190	115
4	48	110	175	49	90	19	48	180	103
5	49	116	184	1950	91	21	49	188	106
6	1950	105	154	51	94	21	1950	185	99
7	51	120	198	52	116	29	51	209	117
8	52	134	194	53	129	27	52	178	93
9	53	169	253	54	83	18	53	173	93
10	54	95	146	55	100	23	54	143	82
11	55	121	181	56	108	24	55	179	108
12	56	144	215	57	111	27	56	201	122
13	57	127	193	58	153	39	57	183	97
14	58	194	–	59	80	–	58	327	176
15	59	101	–	1960	82	–	59	154	88
16	1960	96	–	61	96	–	1960	233	–
17	61	116	–	62	169	–	61	173	–
18	62	211	–	63	76	–	62	205	–
19	1964	92	–	64	66	–	63	152	–
20	65	76	–	65	52	–	64	164	–
21	66	118	–	66	90	–	65	173	–
22	67	100	–	67	77	–	66	183	–
23	68	101	–	68	78	–	67	180	–
24	69	97	–	69	79	–	68	185	–
25	1970	136	–	1970	111	–	69	146	–

№ п/п	Варианты								
	7			8			9		
	р. Западная Двина			р. Припять			р. Западная Двина		
	Год	Витебск Q_{ia}	Вележ i	Год	Мозырь Q_{ia}	Туров Q_i	Год	Витебск Q_{ia}	Полоцк Q_i
1	1945	218	163	1945	287	197	1945	218	314
2	46	202	145	46	237	178	46	202	273
3	47	243	169	47	260	188	47	243	323
4	48	200	149	48	471	327	48	200	279
5	49	196	142	49	279	204	49	196	256
6	1950	259	204	1950	219	153	1950	259	332
7	51	178	113	51	323	229	51	178	265
8	52	233	177	52	172	120	52	233	313
9	53	351	244	53	340	221	53	351	448
10	54	171	127	54	142	98	54	171	237
11	55	235	164	55	381	259	55	235	342
12	56	270	177	56	446	302	56	270	387
13	57	296	219	57	320	214	57	296	400
14	58	324	–	1958	643	377	1958	324	445
15	59	202	–	59	340	219	59	202	285
16	1960	186	–	1960	243	–	1960	186	–
17	61	322	–	61	313	–	61	222	–
18	62	362	–	62	394	–	62	362	–
19	63	130	–	63	290	–	63	130	–
20	64	124	–	64	216	–	64	124	–
21	65	172	–	65	378	–	65	172	–
22	66	233	–	66	450	–	66	223	–
23	67	159	–	67	352	–	67	159	–
24	68	190	–	68	365	–	68	190	–
25	69	140	–	69	415	–	69	140	–

Учебное издание

ГИДРОЛОГИЯ

Практикум
для студентов специальностей
1-70 03 01 «Автомобильные дороги»,
1-70 03 02 «Мосты, транспортные дороги и метрополитены»

Составители:

ШАТАЛОВ Игорь Михайлович
ЮХНОВЕЦ Владимир Николаевич
МИХНОВЕЦ Марина Марковна

Редактор *В. И. Акуленок*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 18.10.2019. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,00. Тираж 100. Заказ 585.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.