

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Институт горного дела и строительства
Кафедра «Санитарно-технические системы»

Утверждено на заседании кафедры
«Санитарно-технические системы»
«20» января 2022 г., протокол № 6

Заведующий кафедрой



Р.А. Ковалев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению курсовой работы
по дисциплине (модулю)
«Гидрология, гидрометрия и гидротехнические сооружения»
основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы бакалавриата

по направлению подготовки
08.03.01 – "Строительство"

с профилем
"Водоснабжение и водоотведение"

Форма(ы) обучения: очная, очно-заочная

Идентификационный номер образовательной программы: 080301-02-22

Тула 2022 год

Разработчик(и) методических указаний

Разработчик:

Корнеева Н.Н., доцент, к.т.н.
(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)



(подпись)

Гидрологические кривые, характеризующие результаты проведенных гидрометрических наблюдений

Основным источником данных для гидрологических расчетов характеристик речного стока является материалы гидрометрических наблюдений на изучаемой реке (или створе).

Результаты гидрометрических наблюдений за режимом стока реки (уровень, расход и т.п.) могут быть представлены в виде графиков (ступенчатых или криволинейных), позволяющих оценить режим стока реки за период наблюдений. Наибольшее распространение в гидрологии получили следующие графики:

- связи;
- хронологические;
- повторяемости (частоты);
- продолжительности (превышения).

Рассмотрим методы их построения на примере результатов наблюдений.

Результаты гидрометрических наблюдений за уровнем воды в реке

В створке "К" реки "М" в течении двух лет велись непрерывные наблюдения за расходом и уровнем воды в реке. В результате обработки получены следующие значения среднемесячных расходов и уровней воды от нуля графика.

Таблица 1

Месяцы		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Отметки, см	1 год	195	287	379	590	420	351	320	252	258	303	291	240
	2 год	240	230	360	475	412	360	330	257	110	262	238	160
Расходы, м ³ /с	1 год	56	77	109	196	120	97	90	71	69	83	81	68
	2 год	67	66	103	143	118	100	91	73	50	71	55	54

Кривая связи расходов и уровней воды в реке

С физической точки зрения независимым переменным является расход Q , т.к. высота стояния уровня H зависит от количества воды, протекающей через живое сечение реки в единицу времени. Но в гидрометрической практике рассматриваемая зависимость используется обычно для определения расхода по заданному уровню, полученному измерением. Поэтому принято за независимую переменную считать уровень, а кривую называют "кривой зависимости расхода в реке от уровня".

По данным табл.1 строим график (рис.1).

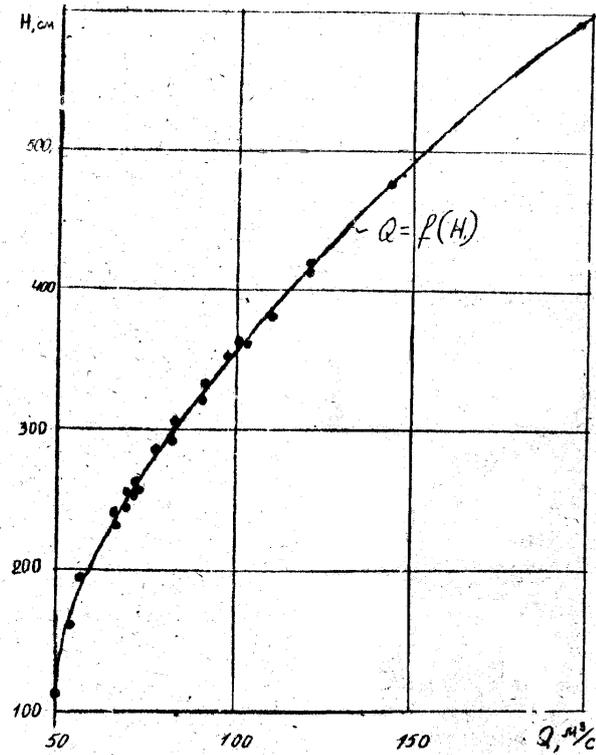


Рис.1. Кривая зависимости расхода от уровня в створе "К" реки "М"

Хронологические графики

По данным таблицы результатов гидрологических наблюдений (табл.1) в хронологическом порядке строится график измерения измеренной величины.

График колебаний уровней

Строится график изменения замеренных уровней воды в реке с течением времени за период наблюдений (рис.2).

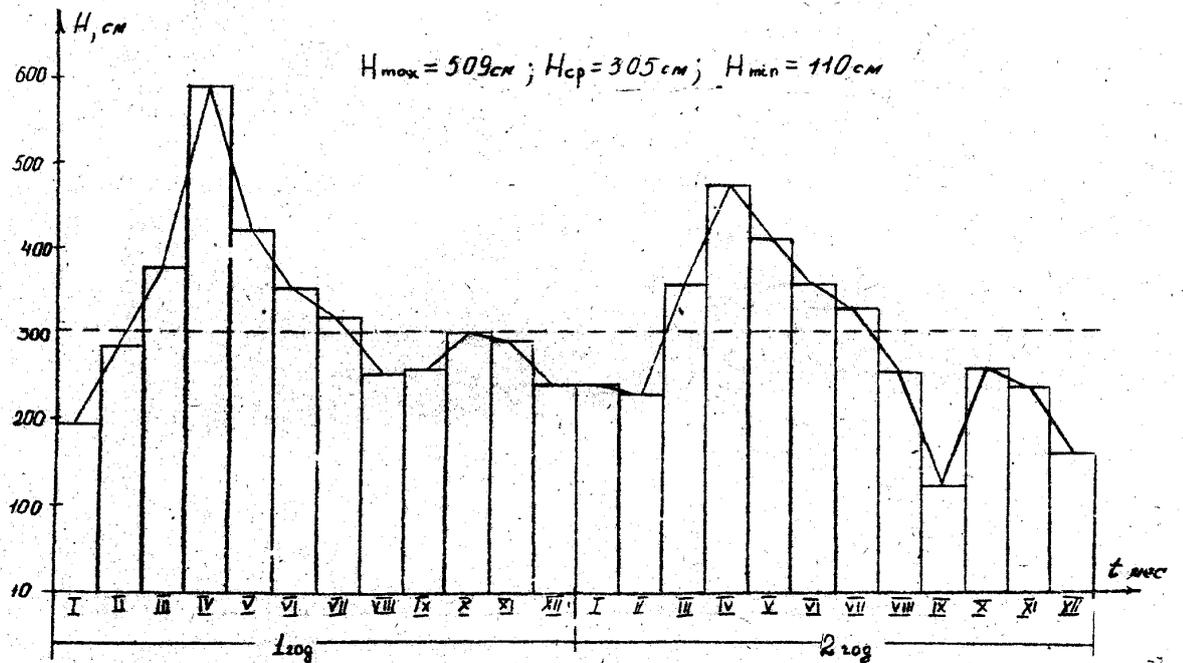


Рис.2. График колебания уровней воды в створе "К" реки "М"

Гидрограф

Гидрографом называется график изменения расхода реки в течение годового цикла.

Годовые циклы могут быть:

- календарные – начинаются с 1 января;
- гидрологические – начинаются с 1-го числа месяца, в котором для данного района начинаются морозы и выпадают твердые осадки (для Тулы – с 1 октября);
- водохозяйственные – начинаются с 1-го числа месяца, в котором бывают самые ранние весенние половодья (для Тулы – с 1 марта).

На рис.3. показаны все три типа гидрографов, построенных по данным гидрометрических наблюдений.

Интегральные кривые стока

Интегральные кривые стока последовательное накопление стока воды в рассматриваемом створе реки за длительный промежуток времени (месяц, сезон, год и т.п.). Интегральная кривая строится или в прямоугольных или в косоугольных координатах.

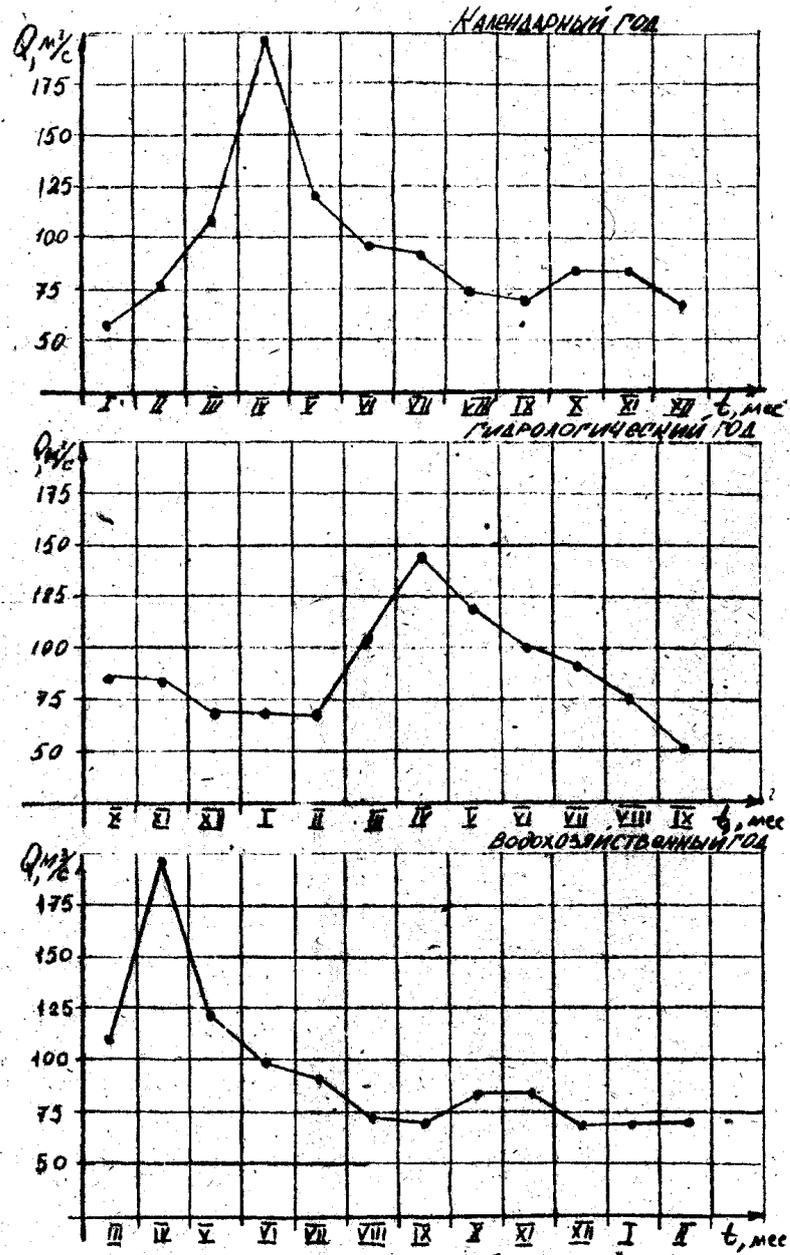


Рис.3. Гидрографы реки "М" в створе "К"

Интегральная кривая стока в прямоугольных координатах

Интегральная кривая стока в прямоугольных координатах строится по формуле

$$W = \sum Q \cdot \Delta t,$$

где Δt - количество секунд в месяце.

Тангенс угла наклона кривой к оси абсцисс численно равен (в нас штабе графика) расходу реки в данный момент времени. Для определения расходов реки в различные моменты времени строится лучевой масштаб. Участки интегральной кривой с крутым подъемом соответствуют весенним периодам нарастания стока, более пологие - межени, летней и зимней. Расчет ведем в табличной форме (табл.2).

Таблица 2

1-й год				2-й год			
Месяц	Q, м ³ /с	ΔW млн.м ³	W млн.м ³	Месяц	Q, м ³ /с	ΔW млн.м ³	W млн.м ³
I	56	150,0	150,0	I	67	179,4	3112,7
II	77	186,3	336,3	II	66	159,7	3272,4
III	109	291,9	628,2	III	103	275,9	3548,3
IV	196	508,0	1136,2	IV	143	370,6	3918,9
V	120	321,4	1457,6	V	118	316,1	4235,0
VI	97	251,4	1709,0	VI	100	259,2	4494,2
VII	90	241,0	1950,0	VII	91	243,7	4737,9
VIII	71	190,2	2140,2	VIII	73	195,5	4933,4
IX	69	178,8	2319,0	IX	50	129,6	5063,0
X	83	222,3	2541,3	X	71	190,2	5253,2
XI	81	209,9	2751,2	XI	66	171,1	5424,3
XII	68	182,1	2933,3	XII	54	144,6	5568,9

Интегральная кривая изображена на рис.4.

Интегральная кривая стока в косоугольных координатах

Интегральная кривая стока в косоугольных координатах строится по формуле

$$W = \sum (Q - Q_{\text{cp}}) \cdot \Delta t .$$

В этом случае кривая изображает нарастание разностей между колеблющимся расходом за какой-либо интервал времени и постоянным средним расходом данной реки за весь период времени наблюдения.

Средний секундный расход реки за весь период наблюдений (2 года)

$$Q_{\text{cp}} = \frac{5568,9 \cdot 10^6}{730 \cdot 86400} = 88,3 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расчет ведем в табличной форме (табл.3).

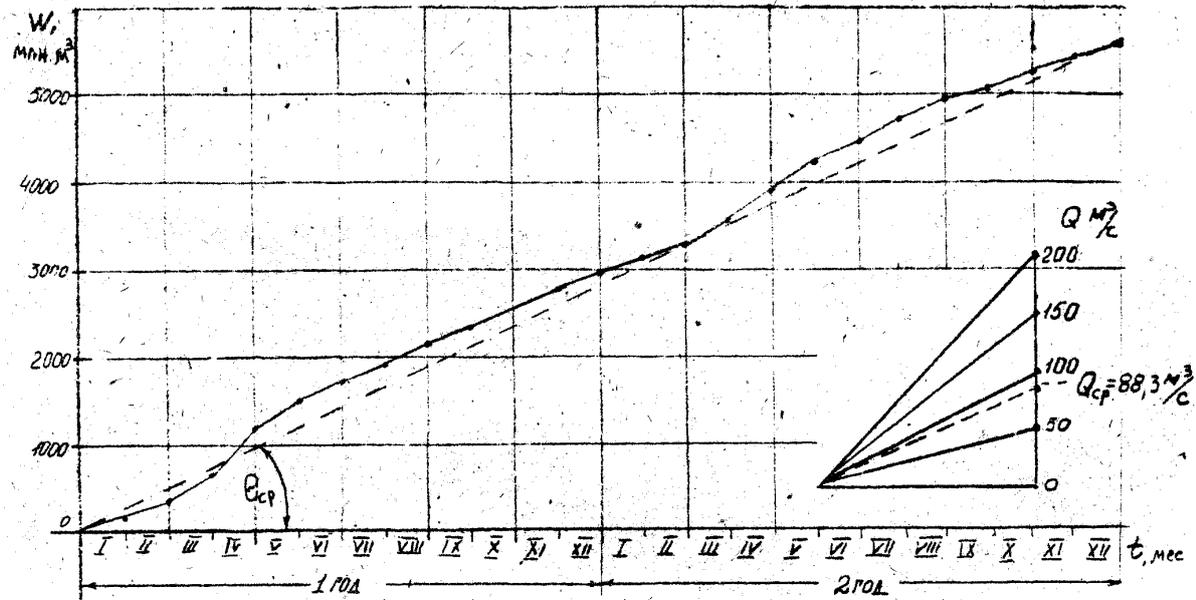


Рис.4. Интегральная кривая стока реки "М" в створе "К" в прямоугольных координатах.

Таблица 3

1-й год				2-й год			
Месяц	$Q - Q_{ср}$, $м^3/с$	ΔW , млн. $м^3$	W , млн. $м^3$	Месяц	$Q - Q_{ср}$, $м^3/с$	ΔW , млн. $м^3$	W , млн. $м^3$
I	-32,3	-86,5	-86,5	I	-21,3	-57,0	92,0
II	-11,3	-27,3	-113,8	II	-22,3	-53,9	38,1
III	20,7	55,4	-58,4	III	14,7	39,4	77,5
IV	107,7	279,2	220,8	IV	54,7	141,8	219,3
V	31,7	84,9	305,7	V	29,7	79,5	298,8
VI	8,7	22,5	328,2	VI	11,7	30,3	329,1
VII	1,7	4,6	332,8	VII	2,7	6,9	336,0
VIII	-17,3	-46,3	286,5	VIII	-15,3	-41,0	295,0
IX	-19,3	-50,0	236,5	IX	-38,3	-99,3	195,7
X	-5,3	-14,2	222,3	X	-17,3	-46,3	149,4
XI	-7,3	-18,9	203,4	XI	-22,3	-57,8	91,6
XII	-20,3	-54,4	149,0	XII	-34,3	-91,6	0

Интегральная кривая стока в косоугольных координатах изображена на рис.5.

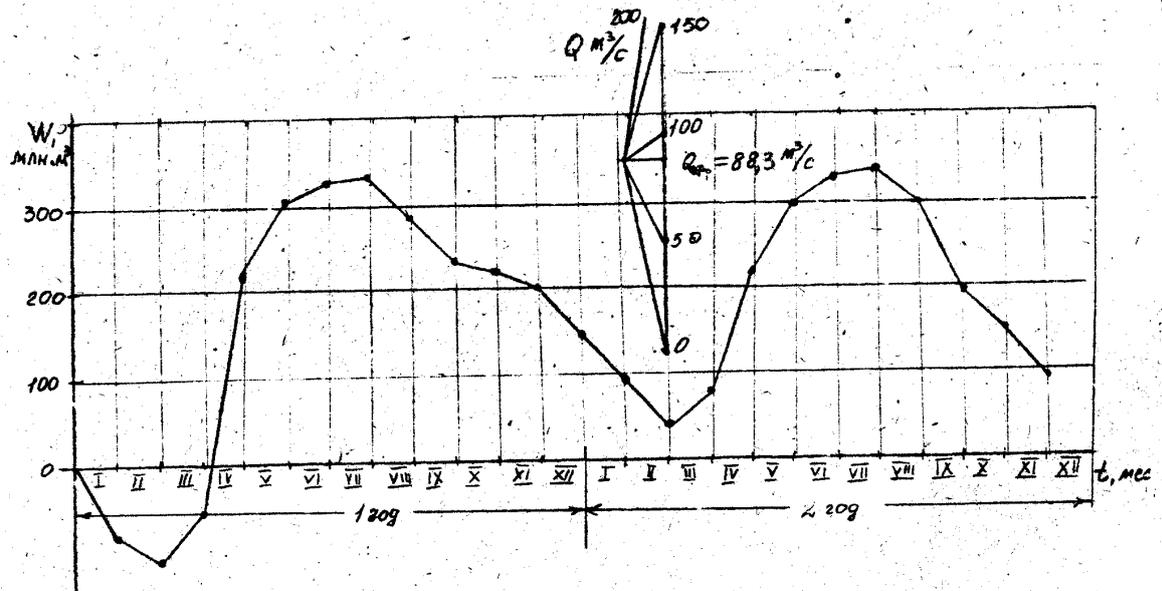


Рис.5. Интегральная кривая стока реки "М" в створе "К" в косоугольных координатах

Графики повторяемости (частоты) уровней воды в реке

График повторяемости (частоты) характеризует распределение наблюдаемой величины (в данном случае – уровней воды) за период наблюдений. Он позволяет установить, сколько раз за рассматриваемый период уровни воды повторялись в той или иной интервале (в количестве раз или в процентах). При большом числе наблюдений ч палых интервалах ступенчатый график повторяемости может быть преобразован в кривую повторяемости (или распределения). Рассмотрим технику построения графика на примере наблюдения за уровнем воды в реке.

Определение координат графика повторяемости (частоты) ведется в табличной форме, сначала по данным табл.1 составим убывающий ряд наблюдаемых уровней воды.

Таблица 4

Отметки уровня воды, см	590	475	420	412	379	360	360	351	330	320	303	291
	287	262	258	257	252	240	240	238	230	195	160	110

Для построения графика повторяемости уровней воды принимаем 10 интервалов

изменения уровней воды между $H_1=600$ см (несколько больше $H_{\max}=596$ см) и $H_2=100$

см (несколько меньше $H_{\min}=112$ см). Следовательно, интервал изменения уровней

$$\Delta H = \frac{600 - 100}{10} = 50 \text{ см.}$$

Из табл.4 определяется количество наблюдений уровня воды в заданном интервале его изменения.

Таблица 5

Интервалы изменения уровней см	от	600	549	499	449	399	349	299	249	199	149	Все- го
	до	550	500	450	400	350	300	250	200	150	100	
Кол-во наблюдений	раз	1	-	1	2	4	3	6	4	2	1	24
	%	4,2	-	4,2	8,3	16,6	12,6	25,0	16,6	8,3	4,2	100

По данным табл. 5 строится график повторяемости (частоты) уровней воды (рис.6).

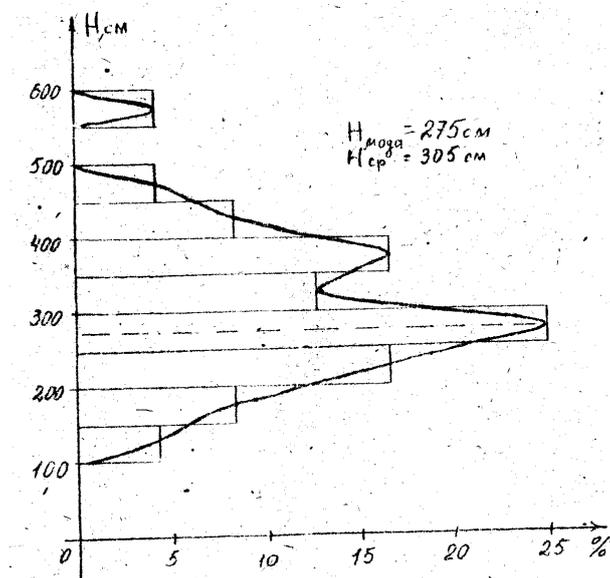


Рис.6. График продолжительности (превышения) уровней воды в створе "К" реки "М".

Уровень воды в реке (ордината графика повторяемости), соответствующий наибольшему значению повторяемости (максимальной абсциссе графика), называется модой. В нашем примере модой является уровень

$H_{\text{мода}} = 275$ см. Среднее значение уровня воды иногда называют центром распределения графика повторяемости. В нашем примере $H_{\text{ср}} = 305$ см.

1.5. График продолжительности (превышения) уровней воды в реке.

Рассмотрим результаты наблюдений за уровнем воды в реке. График продолжительности (превышения) показывает, как часто (в количестве раз или в процентах) было превышено то или иное значение наблюдаемой

величины (в нашем случае - уровня воды) за рассматриваемый период. При увеличении числа интервалов ступенчатый график может быть преобразован в кривую, которая называется кривой продолжительности.

Определение координат графика продолжительности (превышения) ведется в табличной форме. Как правило, в качестве фиксированных уровней берутся те же, что и при построении графика повторяемости. Из таблицы 4 определяется количество наблюдений, уровней, величины которых превышали данный уровень.

Таблица 6.

Уровень Воды, см		600	550	500	450	400	350	300	250	200	150	100
Кол- во набл юден ий	раз	-	1	1	2	4	8	11	17	21	23	24
	%	-	4,2	4,2	8,4	16,7	33,3	45,9	70,9	87,5	95,8	100

По данным таблицы 6 строится график продолжительности (превышения) уровней воды (рис.7). Уровень воды в реке, соответствующий 50%-й продолжительности (превышения)

называется медианным. В нашем случае $H_{\text{медиан.}} = 284\text{см.}$

2. Определение норм гидрологических характеристик речного стока.

При гидрологических расчетах применяют следующие характеристики речного стока:

а). Расход воды Q - количество воды, прошедшее за 1 секунду через живое сечение реки.

Единица измерения - $\text{м}^3/\text{с}$;

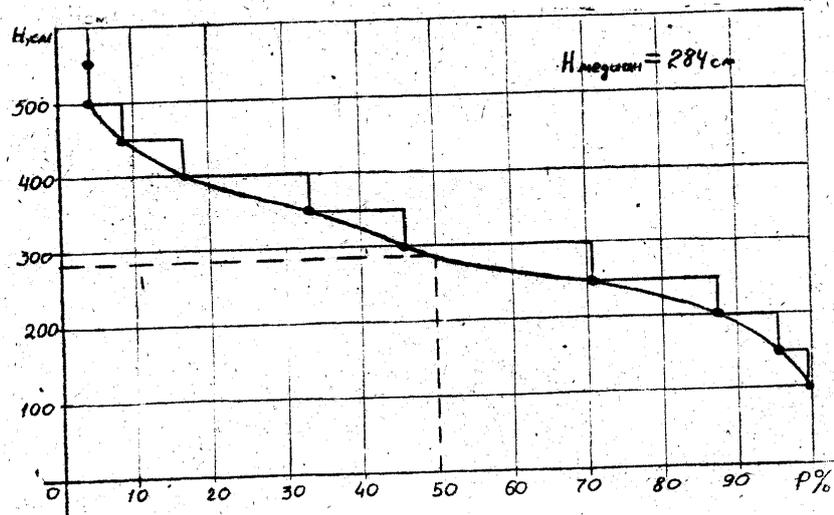


Рис.7. График продолжительности (превышения) уровней воды в створе "К" реки "М".

б). Объем стока W - количество воды, прошедшее за длительный промежуток времени (месяц, год) через живое сечение реки.

Единицы измерения - $м^3/мес.$, $м^3/год$, $км^3/год$;

в). Слой стока y - отношение объема стока к площади водосбора. Единица измерения – $мм/мес.$, $мм/год$;

г). Модуль стока M - отношение расхода воды в реке к площади водосбора. Единица измерения $л/(с \cdot км^2)$;

д). Коэффициент стока η - отношение слоя стока к количеству выпавших осадков за тот же

промежуток времени. Величина безразмерная.

Нормой характеристик речного стока называется среднее их значение за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которой полученное среднее значение существенно не меняется.

Практически за норму гидрологических характеристик речного стока принимается среднее значение, полученное по ряду непрерывных наблюдений за 40 - 60 лет.

Норма характеристик обозначается индексом "о".

Q_o - норма среднегодового расхода, $м^3/с$;

W_o - норма годового объема стока, $к м^3 / год$;

M_o - норма модуля стока, $(л / с, км^2)$;

η_o - норма коэффициента стока.

Отношение характеристики речного стока к своей норме называется модульным коэффициентом:

$$k_i = \frac{Q_i}{Q_o} = \frac{W_i}{W_o} = \frac{M_i}{M_o} = \frac{y_i}{y_o}$$

В зависимости от наличия информации о режиме стока реки норма характеристики стока вычисляется:

а). По данным непосредственных наблюдений за стоком реки за достаточно длительный промежуток времени;

б). Путем приведения средней величины характеристики стока, полученной за короткий ряд наблюдений, к многолетнему по длинному ряду реки - аналога или створа-аналога;

в). При полном отсутствии наблюдений - на основании характеристик стока, полученных в результате обобщения наблюдений на других реках и створах данного района, представленных в виде карт-изолиний и эмпирических таблиц и формул.

Требуется определить нормы характеристик речного стока в следующих случаях (рис. 8):

а). В створе "А" реки "Д" при наличии наблюдений в течение 50 лет;

б). В створе "В" реки "Е" при наличии наблюдений в течение 10 лет;

в). В створе "С" реки "Н" при полном отсутствии наблюдения.

2.1. Определение норм характеристик речного стока при наличии длительного ряда наблюдений.

2.1.1. Результаты наблюдений в створе "А" реки "Д":

а). Среднегодовые расходы Q_{ci} воды речки "Д" в створе "А" (табл.7)

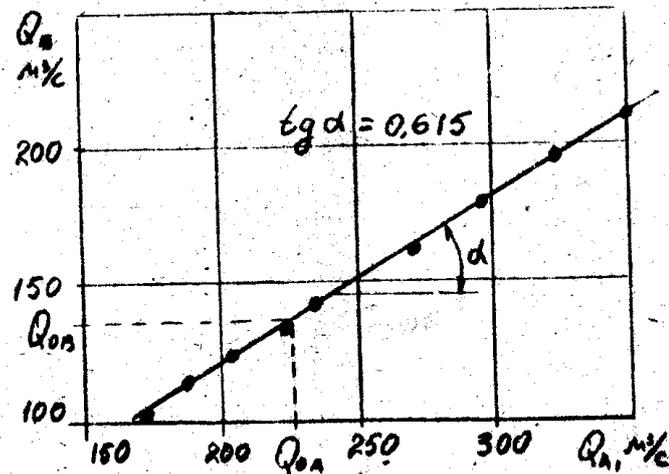
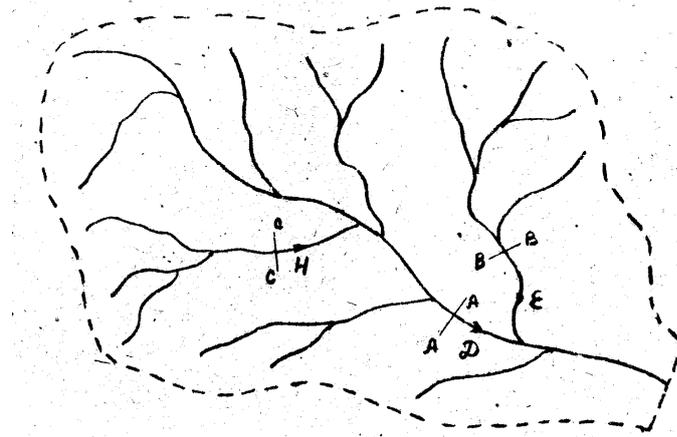


Рис.8. Определение норм характеристик речного стока.

Рис.9. Прямая линия связи рядов наблюдений за расходами воды рек "А" и "В".

б). Среднемноголетний годовой слой осадков $X_i = 550$ мм

в). Площадь водосбора $F = 24000$ км².

г). Длительность наблюдений $N = 50$ лет.

Таблица 7

ГОДЫ	Q _з , м ³ /с								
1930	260	1940	184	1950	265	1960	179	1970	233
1931	250	1941	161	1951	226	1961	101	1971	351
1932	179	1942	145	1952	233	1962	153	1972	171
1933	196	1943	100	1953	242	1963	218	1973	235
1934	176	1944	251	1954	309	1964	202	1974	270
1935	196	1945	247	1955	304	1965	243	1975	296
1936	202	1946	217	1956	170	1966	200	1976	324
1937	207	1947	201	1957	244	1967	196	1977	202
1938	265	1948	254	1958	199	1968	259	1978	186
1939	329	1949	375	1959	156	1959	178	1979	222

2.1.2. Оценка длительности ряда наблюдений

Ряд наблюдений относится к длинным в том случае, если среднее по ряду наблюдений значение величины измеряемой характеристики речного стока существенно не изменится, когда к нему будет добавлено еще несколько лет наблюдений.

Практически ряд наблюдений за средними расходами Q реки считается длинным, если средняя квадратичная ошибка коэффициента вариации не превышает 15%, а нормы расхода Q - 10%. Расположим наблюдаемые (табл.7) среднегодовые расходы Q в убывающем порядке и проведем вычисления по форме табл.8.

Таблица 8.

№ п/п	Q _{ci} м ³ /с В убывающ ем порядке	$K = \frac{Q}{Q_{cp}}$	K-1	(K-1) ²	(K-1) ³
1	2	3	4	5	6
1	375	1,68	0,68	0,4624	0,3144
2	351	1,57	0,57	0,3249	0,1852

3	329	1,48	0,48	0,2304	0,1106
4	324	1,44	0,44	0,1936	0,0852
5	309	1,39	0,39	0,1521	0,0593
6	304	1,36	0,36	0,1296	0,0466
7	296	1,32	0,32	0,1024	0,0328
8	270	1,21	0,21	0,0441	0,0093
9	265	1,18	0,18	0,0324	0,0058
11	260	1,17	0,17	0,0289	0,0049
12	259	1,16	0,16	0,0256	0,0041
13	254	1,14	0,14	0,0196	0,0027
14	251	1,12	0,12	0,0144	0,0017
15	250	1,12	0,12	0,0144	0,0017
16	247	1,10	0,10	0,0100	0,0010
17	244	1,08	0,08	0,0064	0,0005
18	243	1,08	0,08	0,0064	0,0005
19	242	1,07	0,07	0,0049	0,0003
20	235	1,05	0,05	0,0025	0,0001
21	233	1,03	0,03	0,0009	0,0000
22	233	1,03	0,03	0,0009	0,0000
23	226	1,01	0,01	0,0001	0,0000
24	222	0,99	-0,01	0,0001	0,0000
25	218	0,98	-0,02	0,0004	0,0000
26	217	0,97	-0,03	0,0009	0,0000
27	207	0,93	-0,08	0,0049	-0,0003
28	202	0,91	-0,09	0,0081	-0,0007
29	202	0,91	-0,09	0,0081	-0,0007
30	202	0,91	-0,09	0,0081	-0,0007
31	201	0,90	-0,10	0,0100	-0,0010
32	200	0,90	-0,10	0,0100	-0,0010
33	199	0,90	-0,10	0,0100	-0,0010
34	196	0,89	-0,11	0,0121	-0,0013
35	196	0,89	-0,11	0,0121	-0,0013
36	196	0,89	-0,11	0,0121	-0,0013
37	186	0,83	-0,17	0,0289	-0,0049
38	184	0,82	-0,18	0,00324	-0,0058

39	179	0,80	-0,20	0,0400	-0,0080
40	179	0,80	-0,20	0,0400	-0,0080
41	178	0,80	-0,20	0,0400	-0,0080
42	176	0,79	-0,21	0,0441	-0,0093
43	171	0,79	-0,22	0,0484	-0,0106
44	170	0,78	-0,22	0,0484	-0,0106
45	161	0,73	-0,27	0,0729	-0,0197
46	156	0,70	-0,30	0,0900	-0,0270
47	153	0,69	-0,31	0,0961	-0,0298
48	145	0,64	-0,36	0,1296	-0,0466
49	101	0,45	-0,55	0,3025	-0,1664
50	100	0,45	-0,55	0,3025	-0,1664
Итого:	11162	50	0	3,2522	+0,6462

Среднемноголетнее значение среднегодового расхода реки "Д" в створе "А":

$$Q_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} = \frac{11162}{50} = 223 \text{ м}^3/\text{с}$$

Коэффициент вариации (изменчивости) ряда наблюдений служит мерой оценки колебания измеряемой величины относительно ее нормы и численно равен относительному среднему квадратическому отклонению (отношению среднего квадратического отклонения к норме)

$$C_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_i - 1)^2}{N}} = \sqrt{\frac{3,2522}{50}} = 0,255 ,$$

Средняя квадратическая ошибка среднемноголетнего значения среднегодового расхода:

$$\sigma_{Q_{ci}} = \frac{C_v}{\sqrt{N}} \cdot 100\% = \frac{0,255}{\sqrt{50}} \cdot 100\% = 3,61\% < 10\%$$

Средняя квадратическая ошибка коэффициента вариации

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2N}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{1 + 0,255^2}{2 \cdot 50}} \cdot 100\% = 10,32\% < 15\%$$

Следовательно, результаты наблюдений за среднегодовыми расходами воды реки "Д" в створе "А" следует считать гидрологическим рядом достаточной продолжительности (длинным рядом наблюдений).

2.1.3. Определение норы гидрологических характеристик стока реки "Д" в створе "А".

Так как ряд наблюдений (табл.7) за среднегодовыми расходами имеет достаточную длину, то его среднемноголетнее значение будет нормой среднегодового расхода Q_o , т.е.

$$Q_o = \frac{\sum_{i=1}^N Q}{N} = \frac{11162}{50} = 223,24 \cong 223 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Через значение Q_o могут быть вычислены нормы других характеристик стока.

Норма годового объема стока

$$W_o = 31,5 \cdot 10^6 \cdot Q_o = 31,5 \cdot 10^6 \cdot 223 = 7032 \cdot 10^6 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Норма годового слоя стока

$$h_o = \frac{31500 \cdot Q_o}{F} = \frac{31500 \cdot 223}{24000} = 293 \text{ мм} / \text{год}$$

Норма модуля стока

$$M_o = \frac{1000C_o}{F} = \frac{1000 \cdot 223}{24000} = 9,30 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$$

Норма коэффициента стока

$$\eta_o = \frac{h_o}{x_o} = \frac{293}{550} = 0,533$$

В указанных выше формулах, численные значения коэффициентов даны с учетом размерностей всех величин.

2.2 Определение норм характеристик речного стока при наличии короткого ряда наблюдений

2.2.1. Результаты наблюдений в створе "В" реки "Е":

а). Среднегодовые расходы воды (табл.9).

Таблица 9.

Годы	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
$Q_{\text{ср.год}}$	134	214	103	144	164	181	197	123	115	135

б). Период наблюдений $n = 10$ лет.

в). Площадь водосбора $F = 18000 \text{ км}^2$.

г). Годовой слой осадков 540 мм.

Практика гидрологических расчетов показывает, что ряды наблюдения за среднегодовыми расходами воды в реке продолжительностью менее 40 лет нельзя относить к длинным рядам. Поэтому без проведения дополнительных проверок принимаем ряд наблюдений за среднегодовыми расходами воды в створе "В" реки "Е" коротким.

Короткий ряд наблюдений не может служить надежной базой для гидрологических расчетов, поэтому его удлиняют, используя гидрологическую аналогию.

2.2.2 Выбор створа-аналога реки-аналога

В качестве реки-аналога и створа-аналога прием створ "А" реки "Д" (рис.8), на котором велись длительные наблюдения за среднегодовыми расходами воды (табл. 7).

Такой выбор возможен, ибо удовлетворяется основные правила, предъявляемые к аналогам:

1. Физико-географические условия рек "Д" и "Е" сходны между собой, т.к. реки расположены в одном районе;

2. Площади водосборов реки "Д" до створа "А" и реки "Е" до створа "В" не отличаются друг от друга более чем на 30%

$$x \cdot 100\% = \frac{24000 - 18000}{24000} \cdot 100\% = 25\% < 30\%$$

3. Период наблюдений в створе "В" (1970-1979гг.) целиком входит в период наблюдений в створе "А" (1930-1979гг.)

2.2.3. Проверка связи каких-либо гидрологических явлений, обусловленных природными зональными условиями, в разных створах и реках необходимо определить наличие связи между ними.

При рассмотрении каких-либо гидрологических явлений, обусловленных природными зональными условиями, в разных створах и реках необходимо определить наличие связи между ними.

По данным табл.9 и части табл.7 (за период 1970-1979гг.) строим график связи среднегодовых расходов створа "А" реки "Д" и створа "В" реки "Е" (рис.9). Убеждаемся в наличии линейной связи, ибо точки ложатся на прямую типа

$$y = a + bx$$

составляющую с осью абсцисс некоторый угол α . Здесь y - расходы створа "В", а x - расходы створа "А".

Для определения угла α воспользуемся методом наименьших квадратов, смысл

которого заключается в том, что ищется уравнение прямой, сумма квадратов отклонений опытных точек, от которых будет наименьшей. При способе наименьших квадратов

значение коэффициентов a и b в уравнении прямой линии определяется по формулам:

Расчет коэффициентов α и b проведем в табличной форме:

$$\alpha = \frac{\sum y - b \sum x}{n}$$

Таблица 10.

Годы	$Q_b (y)$	$Q_H (x)$	$y \cdot x$	x^2
1970	134	233	31222	54289
1971	214	351	75114	123201
1972	103	171	17613	29241
1973	144	235	33840	55225
1974	164	270	44280	72900
1975	181	296	53576	87616
1976	197	324	63828	104976
1977	123	202	24846	40804
1978	115	186	21390	34596
1979	135	222	29970	49284

Всего:

$$\sum y = 1510$$

$$\sum x = 2490$$

$$\sum x = 2490$$

$$\sum x^2 = 652132$$

Вычисляем значение коэффициентов:

$$b = \frac{10 \cdot 395679 - 2490 \cdot 1510}{10 \cdot 652132 - (2490)^2} = 0,615$$

$$\alpha = \frac{1510 - 0,613 \cdot 2490}{10} = -1,637$$

Следовательно, уравнение прямой линии, определяющей связь среднегодовых расходов в створах "А" реки "Д" и "В" реки "Е", будет таким:

$$Q_b = 0,615Q_A - 1,637$$

Тангенс угла наклона прямой линии связи равен коэффициент перед Q_A т.е.

$$tg\alpha = 0,615$$

Значит, створ "А" реки "Д" служит аналогом для створа "В" реки "Е".

2.2.4. Вычисление норм гидрологических характеристик стока реки "Е" в створе "В"

По данным таблицы 10 определим две величины:

- а). Среднеарифметическое значение расхода реки "Д" за 1970-1979 гг.

$$Q_{ciA} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Ai}}{n} = \frac{2450}{10} = 245 \text{ м}^3 / \text{с}$$

- б). Среднестатистическое значение расхода реки "Е" в створе "В"

$$Q_{ciB} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Bi}}{n} = \frac{1510}{10} = 151 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Норма среднегодового расхода реки "Е" в створе "В" может быть вычислена через норму расхода реки-аналога "Д" в створе "А" следующим образом:

- а). Аналитически

$$Q_{OB} = Q_{OA} \frac{Q_{ciB}}{Q_{ciA}} = 223 \frac{151}{249} = 135,2 \approx 135 \text{ м}^3 / \text{с}$$

б). Графически по рис.9

$$Q_{OB} \approx 135 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Норма годового объема стока

$$W_{OB} = 31,5 \cdot 10^6 \cdot Q_{OB} = 31,5 \cdot 10^6 \cdot 135 = 4252 \cdot 10^6 \text{ м}^3 / \text{год} = 4,3 \frac{\text{км}^3}{\text{год}}$$

Норма годового слоя стока

$$h_{OB} = \frac{31500 \cdot Q_{OB}}{F_B} = \frac{31500 \cdot 135}{18000} = 236 \text{ мм} / \text{год}$$

Норма модуля стока

$$M_{OB} \frac{1000 \cdot Q_{OB}}{F_B} = \frac{1000 \cdot 135}{18000} = 7,5 \text{ л} / (\text{с} \cdot \text{км}^2)$$

Норма коэффициента стока

$$\eta_{OB} = \frac{h_{OB}}{x_{cp}} = \frac{236}{540} = 0,437$$

2.3. Определение нормы гидрологических характеристик речного стока при отсутствии наблюдений.

В створе "С" реки "Н" гидрологические наблюдения не велись. Для определения норм гидрологических характеристик речного стока воспользуемся картой изолиний среднемноголетних модулей стока и картой изолиний годового количества осадков (картой изогипс).

Пусть для реки "Н" в створе "С" площадь водосбора составила $F_c = 1200 \text{ км}^2$, а норма модуля стока $M_{oc} = 8 \text{ км}^2$ и среднемноголетнее количество осадков $X_{oc} = 550 \text{ мм} / \text{год}$.

Норма среднегодового расхода

$$Q_{oc} = \frac{M_{oc} \cdot F_c}{1000} \cdot 3 = \frac{8 \cdot 1200}{1000} = 9,6 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Норма годового объема стока

$$h_{oc} = 31,5 \quad M_{oc} = 31,5 \cdot 8 = 252 \text{ мм / год}$$

Норма коэффициента

$$\eta_{oc} = \frac{h_{oc}}{x_{oc}} = \frac{252}{550} = 0,458$$

3. Построение кривых обеспеченности среднегодовых расходов воды в реке

Обеспеченностью гидрологической величины называется вероятность того, что рассматриваемое ее значение может быть превышено. Чем больше рассматриваемая величина гидрологической характеристики (например, расхода, уровня и т.п.), тем меньше вероятность ее превышения (меньше обеспеченность) и наоборот - малые величины имеют большую обеспеченность.

Обеспеченностью p среднегодового расхода реки Q_{c2} может быть названо среднее число лет (выраженное в процентах или долях от общего числа лет), в котором среднегодовой расход реки будет больше или равен данному.

Кривая обеспеченности - это интегральная кривая, показывающая обеспеченность (в процентах или в долях от единицы) данной величины среди общей совокупности ряда.

Кривые обеспеченности могут быть построены в виде эмпирических (наблюденных) или аналитических (теоретических) кривых.

3.1. Построение эмпирической кривой обеспеченности

Эмпирические кривые обеспеченности строятся при наличии длительного ряда наблюдений за гидрологической величиной. При расчете параметров эмпирической кривой обеспеченности значения гидрологической величины (расхода, уровня и т.п.) рассматриваются в виде статистического ряда, т.е. ряда, расположенного в убывающем порядке. При этом величина обеспеченности каждого члена ряда определяется по формуле, вид которой зависит от вида гидрологической величины. Так, например, при построении кривых обеспеченности годового, сезонного и многолетнего стока для определения обеспеченности применяется формула

$$\rho = \frac{m - 0,3}{N + 0,4} \cdot 100\%$$

а для максимального стока

$$\rho = \frac{m}{N + 1} \cdot 100\%$$

В этих формулах:

m - порядковый номер величины в убывающем ряду наблюдений;

N - число наблюдений.

Построим эмпирическую кривую обеспеченности для среднегодового расхода реки "Д" в створе "А" (рис. 8, табл. 7), убывающий ряд среднегодовых расходов заимствуем из колонки 2 табл. 8.

Расчет ведется в табличной форме (табл. 11).

Таблица 11

№ п/п	Q _{ci} м ³ /с	ρ%	№ п/п	Q _{ci} м ³ /с	ρ%	№ п/п	Q _{ci} м ³ /с	ρ%
1	375	1,39	18	243	35,12	35	196	68,85
2	351	3,37	19	242	37,10	36	196	70,83
3	329	5,36	20	235	39,09	37	186	72,82
4	324	7,34	21	233	41,07	38	184	74,80
5	309	9,33	22	233	43,06	39	179	76,78
6	304	11,31	23	226	45,04	40	179	78,77
7	296	13,29	24	222	47,02	41	178	80,75
8	270	15,28	25	218	49,01	42	176	82,74
9	265	17,26	26	217	50,99	43	171	84,72
10	265	19,25	27	207	52,98	44	170	86,71
11	260	19,25	27	207	52,98	45	161	88,69
12	259	23,21	29	202	56,96	46	156	90,67
13	254	25,20	30	202	58,94	46	156	90,67
14	251	27,18	31	201	60,91	48	145	94,64
15	250	29,17	32	200	62,90	49	101	96,61
16	247	31,15	33	199	64,88	50	100	98,61

17	244	33,13	34	196	66,86			
----	-----	-------	----	-----	-------	--	--	--

Эмпирическая кривая обеспеченности приведена на рис. 10.

Она позволяет по величине расхода воды определить обеспеченность его (вероятность превышения) с точностью, зависящей от длительности ряда наблюдений. Кроме того, по заданной обеспеченности можно найти соответствующий ей расход воды.

Эмпирическая кривая обеспеченности более точно, чем кривая продолжительности (см. п. 1.5), определяет вероятность превышения заданной гидрологической величины (расхода, уровня и т.п.).

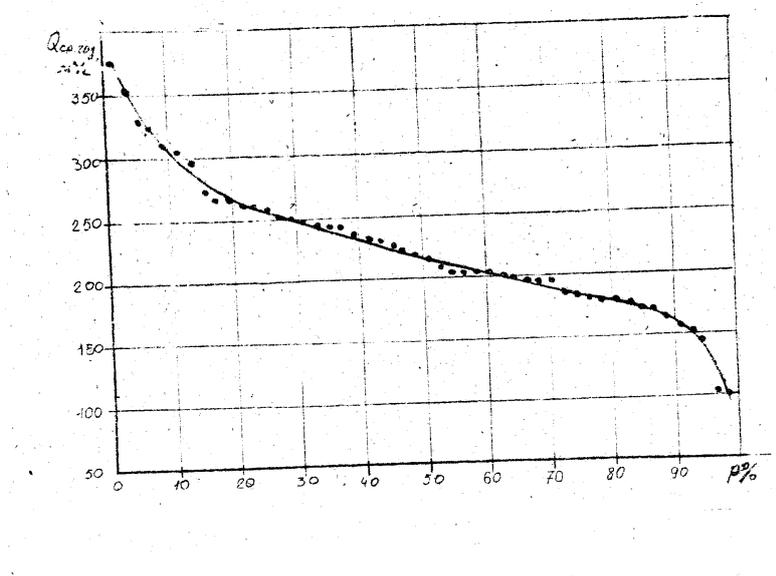


Рис.10. Эмпирическая кривая обеспеченности среднегодовых расходов реки "Д" и "А".

3.2. Построение теоретических кривых обеспеченности

Теоретические (аналитические) кривые обеспеченности применяются для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых. Теоретическими схемами аналитических кривых обеспеченности, применяемых при гидрологических расчетах случайных величин, являются схемы трехпараметрического гамма распределения.

Для построения теоретической кривой обеспеченности с помощью таблиц Фостера-Рыбкина необходимо и достаточно определить три основных параметра ее:

- а) норму характеристики стока;
- б) коэффициент вариации C_v (изменчивости);

в) коэффициент асимметрии C_g (не симметрии).

Методы их определения зависят от длительности наблюдений за характеристикой стока.

3.2.1. Построение теоретической кривой обеспеченности при наличии длинного ряда наблюдений

Рассмотрим ряд наблюдений за среднегодовым расходом реки "Д" в створе "А", приведенный в табл. 7

В п. 2.1.3. вычислена норма среднегодового расхода

$$Q_o = 223 \text{ м}^3/\text{с}.$$

В п. 2.1.2. вычислен коэффициент вариации ряда $C_v = 0,225$.

Вычислим коэффициент асимметрии C_1 данного ряда наблюдений.

Коэффициент асимметрии C_1 - безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности ряда рассматриваемой гидрологической величины относительно ее среднего значения.

При большом числе членов ряда коэффициент асимметрии определяется по формуле

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^N (K_i - 1)^3}{NC_v^3} = \frac{0,6462}{50 \cdot 0,255^3} = 0,779$$

где значение взято из колонки 6 табл. 8. Средняя квадратическая ошибка определения коэффициента асимметрии вычисляется по формуле

$$\sigma_{C_3} = \frac{100\%}{C_3} \sqrt{\frac{6}{N} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)} = \frac{100\%}{0,779} \sqrt{\frac{6}{50} (1 + 6 \cdot 0,225^2 + 5 \cdot 0,255^4)} = 52,8\%$$

Следовательно, данный ряд наблюдений не позволяет достаточно точно вычислить коэффициент асимметрии.

Как правило, в гидрологических расчетах коэффициент асимметрии C_1 определяют через коэффициент вариации

$$C_1 = \alpha C_v,$$

где величина коэффициента, α зависит от вида гидрологической характеристики стока.

Если исследуется среднегодовой расход $Q_{0.5}$, то принимают $\alpha = 2$.

Следовательно, в нашем примере

$$C_s = 0,225 \times 2 = 0,51.$$

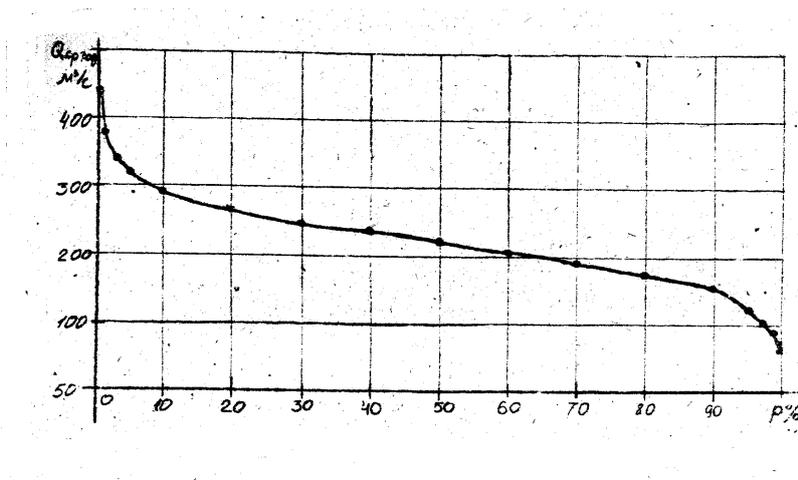
Для построения теоретической обеспеченности пользуемся Фостера-Рыбкина. Расчет ведем в табличной форме при

$$C_v = 0,225$$

$$C_l = 0,651 \text{ и } Q_0 = 223 \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{табл.12})$$

Таблица 12

$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_0$	$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_0$
0,1	3,83	1,977	441	60	- 0,33	0,916	204
1	2,69	1,686	376	70	- 0,58	0,852	190
3	2,08	1,530	341	80	- 0,85	0,783	175
5	1,77	1,451	324	90	- 1,22	0,689	154
10	1,77	1,451	324	90	- 1,22	0,689	154
20	0,81	1,206	269	97	- 1,49	0,643	143
30	0,46	1,117	249	99	- 1,95	0,503	117
40	0,17	1,043	233	99,9	- 2,38	0,393	88
50	-0,07	0,982	219	-	-	-	-



Теоретическая кривая обеспеченности среднегодового расхода реки "Д" в створе "А" показана на рис. 11.

Рис. 11. Теоретическая кривая обеспеченности среднегодовых расходов реки "Д" в створе "А"

3.2.2. Построение теоретической кривой обеспеченности при коротком ряде наблюдений

Рассмотрим ряд наблюдений за среднегодовым расходом реки "Е" в створе "В", приведенный в табл. 9. Как и при определении норм гидрологических характеристик, стока реки, ряд наблюдений является коротким. Удлиним его с помощью ряда-аналога (табл. 7) для створа-аналога "А" реки "Д" (см. п.п. 2.2.2. и 2.2.3.).

В п. 2.2.2. вычислена норма среднегодового расхода реки "Е" в створе "В" $Q = 135 \text{ м}^3/\text{с}$.

Коэффициент вариации короткого ряда C_{vB} , удлиненного с помощью ряда-аналога,

вычисляется так:

$$C_{vB} = C_{vA} \frac{Q_{OA}}{Q_{OB}} \cdot \operatorname{tg} \alpha = 0,255 \cdot \frac{233}{135} \cdot 0,615 = 0,259$$

Коэффициент асимметрии ряда наблюдений за среднегодовым расходом в створе "В" реки "Д"

$$C_{sB} = 2C_{vB} = 2 \cdot 0,259 = 0,518$$

Для построения теоретической кривой обеспеченности среднегодового расхода реки "Е" в створе "В" повторим вычисления по форме табл. 12 (табл. 13).

Таблица 13

$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v + 1$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_v$	$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_v$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	3,84	1,991	269	60	-0,33	0,914	123
1	2,70	1,702	230	70	-0,58	0,850	115
3	2,09	1,541	208	80	-0,85	0,780	105
5	1,77	1,458	197	90	-1,22	0,684	92
10	1,32	1,342	181	95	-1,48	0,617	83
20	0,81	1,206	163	97	-1,65	0,573	77
30	0,46	1,119	151	99	-1,94	0,497	67
40	0,17	1,044	141	99,1	-2,37	0,386	52
50	-0,08	1,021	138	-	-	-	-

Теоретическая кривая обеспеченности среднегодового расхода реки "Е" в створе "В" показана на рис. 12.

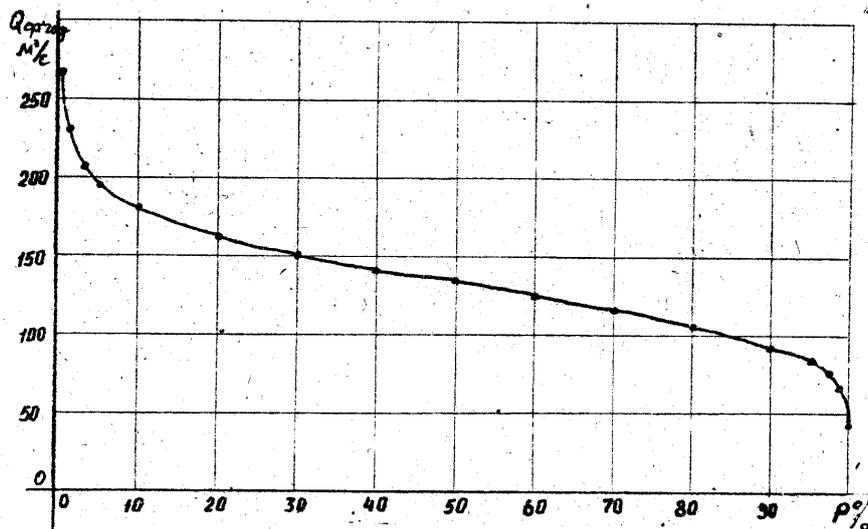


Рис.12. Теоретическая кривая обеспеченности среднегодовых расходов реки "Е" в створе "В".

3.2.3. Построение теоретической кривой при отсутствии наблюдений

Рассмотрим технику построения теоретической кривой обеспеченности среднегодовых расходов реки "М" в створе "С", где гидрометрические наблюдения не велись.

В п. 2.3. определена норма среднегодового расхода $Q_{oc} = 9,6 м^3 / с$.

По карте изолиний географического параметра "а" в формуле Д.Л. Соколовского находим $a=0,55$. Тогда коэффициент вариации

$$C_v = a - 0,063 \lg(F + 1) = 0,55 - 0,063 \lg(1200 + 1) = 0,356.$$

Коэффициент асимметрии

$$C_s = 2C_v = 2 \cdot 0,356 = 0,702 \approx 0,7$$

Вычисление координат кривой обеспеченности ведем в табличной форме (табл. 14).

Таблица 14

$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v + 1$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_v$	$P\%$	$\phi_{P\%}$	$K_{P\%} =$ $= \phi_{P\%} \cdot C_v + 1$	$Q_{P\%} =$ $= K_{P\%} \cdot Q_v$
0,1	4,10	2,460	23,6	60	-0,36	0,872	8,4
1	2,82	2,000	19,2	70	-0,60	0,786	7,5
3	2,15	1,765	16,9	80	-0,85	0,697	6,7
5	1,82	1,648	15,8	90	-1,18	0,580	5,6
10	1,33	1,472	14,1	95	-1,42	0,494	4,7
20	0,79	1,281	12,3	97	-1,57	0,441	4,2
30	0,43	1,153	11,1	99	-1,81	0,356	3,4
50	-0,12	0,957	9,2	99,2	-2,14	0,238	2,3

Теоретическая кривая обеспеченности среднегодового расхода реки "Н" в створе "С" показана на рис. 13.

