

United States Department of the Interior
Bureau of Reclamation
Office of Chief Engineer

HYDRAULICS BRANCH
OFFICIAL FILE COPY

Translation No. 828

BUREAU OF RECLAMATION
HYDRAULIC LABORATORY

OFFICE
FILE COPY

WHEN BORROWED RETURN PROMPTLY

TESTS OF THEORETICAL CALCULATIONS OF DISCHARGES OF SUSPENDED
SEDIMENT IN PLAINS RIVERS

(Opyt teoreticheskogo rascheta raskhodov vzveshennykh
nanosov ravninnykh rek)

By

K. V. Razumikhina

Translated from the Russian: Trudy Gosudarstvennogo
gidrologicheskogo instituta No. 156, Gidrometeoizdat,
Leningrad, pp 31-38, 1968

By

D. L. King
Hydraulics Branch
Division of Research

Office of Engineering Reference
Library Branch
Denver, Colorado

Translation No. 828

January 1970

UNITED STATES
DEPARTMENT OF THE INTERIOR
BUREAU OF RECLAMATION
OFFICE OF CHIEF ENGINEER

TESTS OF THEORETICAL CALCULATIONS OF DISCHARGES OF SUSPENDED
SEDIMENT IN PLAINS RIVERS

(Opyt teoreticheskogo rascheta raskhodov vzveshennykh
nanosov ravninnykh rek)

By

K. V. Razumikhina

Translated from the Russian: Trudy Gosudarstvennogo
gidrologicheskogo instituta No. 156, Gidrometeoizdat,
Leningrad, pp 31-38, 1968

By

D. L. King
Hydraulics Branch
Division of Research

Note: This is a working translation

Office of Engineering Reference
Denver, Colorado
January 1970

ABSTRACT

Formulas are presented for computation of the discharge of suspended sediment in plains rivers. The formulas relate the turbidity of the flow to the sediment discharge through computation of scour turbidity (related to streamflow characteristics) and a hydromechanical sediment parameter (related to sediment composition and streamflow characteristics). The granular roughness of the streambed is determined by analysis of particle sizes. Computed and measured values of the sediment discharge are compared for various phases of the flow regime, including low flows and spring floods. The relationship between sediment discharge is shown to depend on river characteristics and the rivers studied are classed in three groups. Recommendations for application of the formulas and the limits of applicability are discussed.

DESCRIPTORS--/*fluvial hydraulics/ foreign research/ theory/ mathematical analysis/ irrigation canals/ riverflow/ suspended sediments/ sediment transport/ *sediment discharge/ streamflow records/ Chezy equation/ *turbidity/ grain sizes/ roughness (hydraulic)/ reservoirs/ *bottom sediments/ regime/ hydrographs/ *rivers/ flow rates/ flood plains/ discharge (water)/ discharge measurement/ streambeds

IDENTIFIERS--/USSR/ high flow/ flood stages

TESTS OF THEORETICAL CALCULATIONS OF DISCHARGES
OF SUSPENDED SEDIMENT IN PLAINS RIVERS

By

K. V. Razumikhina

Introduction

In connection with preparation of standard instructions for computing silting of reservoirs, the sedimentation laboratory of GGI 1/ verified the applicability of the formulas of transport capacity by streamflow. Several formulas and calculation methods were examined in earlier work by the author (References 5 and 6). Earlier in SANIIRI 2/ A. V. Efremov (Reference 1) carried out similar verifying calculations on transport capacity formulas most widely used at the time (formulas of A. N. Gostunskii, E. A. Zamarin, A. G. Khachatrian, S. Kh. Abal'ianets and others). Special investigations to study transport capacity were conducted on canal irrigation systems of Central Asia and in laboratories to obtain reliable basic data. On the basis of this work it was established that the examined empirical formulas gave satisfactory results only for the conditions near to those for which they were obtained. The formulas of M. A. Velikanov, A. N. Gostunskii, S. Kh. Abal'ianets,

1/Translator's note: National Hydrological Institute.

2/Translator's note: Central Asian Scientific Research Institute for Irrigation named for V. D. Shurin.

having an established theoretical basis and being very close to each other, as A. V. Efremov points out, are not sufficiently accurate and in a majority of cases show a significant deviation when compared with the measured values.

The formulas of Gostunskii, Zamarin, and Abal'ianets are most often used by design organizations for calculating the silting of irrigation canals. However, the applicability of these formulas to streamflow has not been verified to a sufficient degree.

Comparison of measured and calculated values of turbidity carried out by the author (Reference 5) showed that for calculating the transport capacity of streams a comparatively better result, on the average, is obtained from the theoretical method of A. V. Karaushev (Reference 3). The basic computation formula of which takes the form

$$S_{tr} = S_{sc} G, \quad (1)$$

where

S_{tr} = the average turbidity of the flow corresponding to the transport capacity

G = the hydromechanical sediment parameter, which in relation to the method of determining the composition of the sediment is computed either according to the suspended fraction of the bottom sediments or according to the fraction of suspended sediment and depends on a number of factors among which are the composition of sediment, the velocity of flow and Chezy's coefficient.

S_{sc} = scour turbidity determined according to the formula

$$S_{sc} = 150 \frac{N v_b^2}{H}, \quad (2)$$

where

v_b = bottom flow velocity

H = average depth

N = a dimensionless number describing the functions of Chezy's coefficient C

The discharge of suspended sediment R_s is expressed by the formula

$$R_s = S_{tr} Q \quad (3)$$

where Q = discharge.

The main advantage of the method considered, as indicated by the formulas given by the authors above, is the possibility of a detailed estimate of the grain size composition of the sediment. Various relationships are used, as noted, for estimating the fractional composition of the transported sediment and estimating the composition of the bottom deposits. Streamflow field data confirmed that the best result is obtained from a variation of formula (1) which proposes calculation of the hydromechanical sediment parameter G according to the composition of the bottom sediment.

The applicability of formula (1) to streamflows will be examined in detail below. First, however, it was found necessary to define

the problem concerning computation of the Chezy coefficient C which significantly influences the transport capacity of the flow,

Determining the Particle Sizes for Characterizing
the Granular Roughness of the Streambed

In the literature a series of methods is given for determining the Chezy coefficient C with respect to the relative roughness of the streambed. One of the most basic relationships for this is Shtrikler's ^{3/} formula (2 and 4) (see also the paper of V. M. Makkaveev in the same journal). Shtrikler's formula with a corrected coefficient (2) takes the form:

$$C = 33 \left(\frac{H}{d_e} \right)^{1/6}$$

where

H = the average depth in m

d_e = the effective diameter of bottom sediment in mm determining the granular roughness of the streambed.

The value of the effective diameter of the bottom sediment is assumed to be different in relation to the properties of the soil composing the streambed. So, A. Ia. Svartsman (8) recommends that it is effective to assume for the bank zone of the reservoir that the

^{3/}Translator's note: No reference was found to this formula in available sources, so the name is transliterated in the text, but probably should be written Strickler.

diameter of the bottom deposits is limited on the integral graph of the grain size of the bottom sediments to 10 percent large-size deposits. For the Polomet' River the author established that the effective diameter of the bottom sediments is the particle diameter corresponding to the 50 percent value on the grain-size curve (Reference 6). Data from observations on a number of other plains rivers will be used further on. In Table 1 are given results of the determination of the coefficient C using Chezy's formula (for surveyed slopes) and using the interpolation method of R. A. Shestakova (Reference 7). Parallel data are given for C computed according to Shtrikler's formula, using as the effective diameter of the particle the 10 and 50 percent grain sizes of the bottom sediment composition. Table 1 shows that the best result is obtained by calculating the coefficient of the effective diameter using the 50 percent grain-size sediment composition. This result is justified for rivers with gravelly-sandy streambeds, the sediment size of which is found in the range from 0.05 to 10-20 mm, with the dominant fraction 1 to 0.5 and 0.5 to 0.2 mm.

The composition of the bottom sediments in the rivers examined is presented in Table 2. Additional control verification of several values of C computed for several values of d_e was carried out by means of comparing the calculated and measured sediment discharge R .

Table 1

VALUES OF CHEZY'S COEFFICIENT C, OBTAINED FROM VARIOUS
FORMULAS (MEAN VALUES AFTER HIGH WATER)

River and station	Year	$C = \frac{v}{\sqrt{HI}}$	According to Shestakova's data	$C = 33 \left(\frac{H}{d_e} \right)^{1/6}$	
				d 50% e	d 10% e
Unzha - Manturovo	1961		40.8	43.0	31.6
	1962		40.8	38.9	29.6
	1963		40.8	46.6	31.1
Moksha - Temnikov	1962	39.3		38.7	33.9
	1963	38.6		37.0	33.1
Moloma - Shchetinenki	1958	42.4		40.8	31.0
	1961		40.8	39.8	28.8
	1962		40.8	45.0	37.7
	1963		40.8	42.6	35.8
Bystritsa - Shipitsyno	1963		41.6	37.1	33.2
Kama - Tarlovka	1958	55.3		57.0	31.8
Kama - Sarapul	1958	42.2		42.0	29.6
Obva - Karachai	1958	40.0		39.7	22.5

Table 2

GRAIN SIZE COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS

River and station	Year and date	Diameter of the particles d (mm) and their amount in percent by weight								
		10-5	5-2	2-1	1-0.5	0.5-0.2	0.2-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	<0.01
Unzha - Manturovo	3-31-1961	3.3	11.4	4.6	32.1	43.0	2.8	0.5	2.3	
	6-20-1962	17.1	11.9	8.4	25.1	26.9	1.5	0.4	8.7	
	4- 8-1963	18.9	5.8	8.2	37.7	22.1	4.6	0.7	2.0	
Moksha - Temnikov	4-23-1961	0.5	0.5	2.9	28.0	46.8	15.5	1.6	4.1	
	5- 3-1962	0.1	0.2	2.0	26.1	55.2	9.1	0.9	6.4	
	3-25-1963		0.7	3.6	43.6	42.0	7.2	0.6	2.3	
Moloma - Shchetinenki	4- 7-1961	7.7	11.7	10.8	48.8	16.5	2.5	0.3	1.6	
	9-14-1962	6.6	12.4	16.7	33.5	28.2	1.3	0.2	1.1	
	4-27-1963	1.5	3.7	9.0	38.6	28.8	4.4	3.9	5.2	5.0
Bystritsa - Shipitsyno	4-13-1963	5.2	2.3	1.8	38.4	47.1	2.3	0.5	2.3	
Kama - Volosnitskoe	1958	25.1	10.0	3.7	28.1	19.5	2.4	11.0		
	1959	28.0	7.0	5.0	37.1	14.0	1.6	7.0		
	1960	24.1	8.0	4.0	32.7	21.7	1.6	8.1		

Figure 1 shows that, for determination of C using an effective diameter d_e 50% grain size, the agreement of R_{comp} and R_{meas} is much better than when using d_e 10% of grain size for computing C . Thus, the most essential difference occurs during high values of water and sediment discharge.

Computation of the Sediment Discharge for Various Phases of the River Regime

The most reliable and complete field data are used to solve problems concerning the use of theoretical methods (Reference 3) to calculate sediment discharge during various phases of the river regime. Several sites were chosen on various rivers situated in various natural conditions:

Belaia River at Birsk	Medveditsa River at Archedinsk
Belaia River at Ufa	Ural River at Topoli
Kama River at Volosnitskoe	Viatka River at Kirov
Oka River at Kaluga	Sura River at Trakhaniotovo
Oka River at Novinki	Siun' River at Min'larovo
Don River at Khovanskii	Polomet' River at Iazhelbitsy
Don River at Kazansk	and others.

These rivers have a large percentage of well defined single peaks during spring runoff. Such a hydrograph is characteristic of most of the plains rivers in the USSR. The connection between the measured water discharge and the suspended sediment discharge is usually expressed for rivers of such a type with a single loop-shaped curve, the right branch of which corresponds to a period of increasing flow and turbidity (rising flood) and the left to a period of decrease of these elements (falling flood).

Moreover, data from the Syr-Dar'ia River were used as an example of a Central Asian river with high turbidity, which is representative of a multiple-flood regime. The connection between water discharge and sediment discharge for rivers of such type ordinarily is characterized by single-valued curvilinear relationships with some scattering of points.

Comparing the results of estimating the suspended sediment discharge, computed using formula (1), with the turbidity field data showed that there must be a specific approach to calculations for the various phases of the riverflow regime of plains rivers.

Analysis of the configuration of the graphical relationship of the computed points $R = f(Q)$ makes it possible to divide all the rivers studied into three groups (Table 3). These groups are distinguished

by the grain size of the bottom deposits. The typical composition of the bottom deposits for rivers in these groups is shown in Table 4. The calculated points for rivers in the first group are located on the falling branch. Of a similar nature are rivers with gravelly-sandy composition of the bottom sediments with grain sizes from 0.05 to 10-20 mm and having fractions in the percent range from 0.2 to 1 mm. Figure 2 presents an example of such a distribution of measured and estimated values of R. The graph shows that Points 2, 3, and 4, corresponding to the period of the beginning of spring runoff, have the greatest deviation from the field curves. The estimated sediment discharge in this period shows underestimation in comparison with the measured discharge by two to three times.

Beginning with Point 5, representing the maximum water discharge, and farther along on the falling branch of the high water curve, these divergences are reduced sharply, showing almost full agreement between the measured and estimated values.

Figure 3 shows the second type of relationship between estimated and measured sediment discharge when the calculated values of R are located on the rising branch at the spring flood time; however, for falling high water the estimated values turn out to be higher. This type includes rivers with streambeds of silty-sandy alluviums with the grain size from 0.001 to 1 mm and having fractions in the percent range from 0.2 to 0.05 mm.

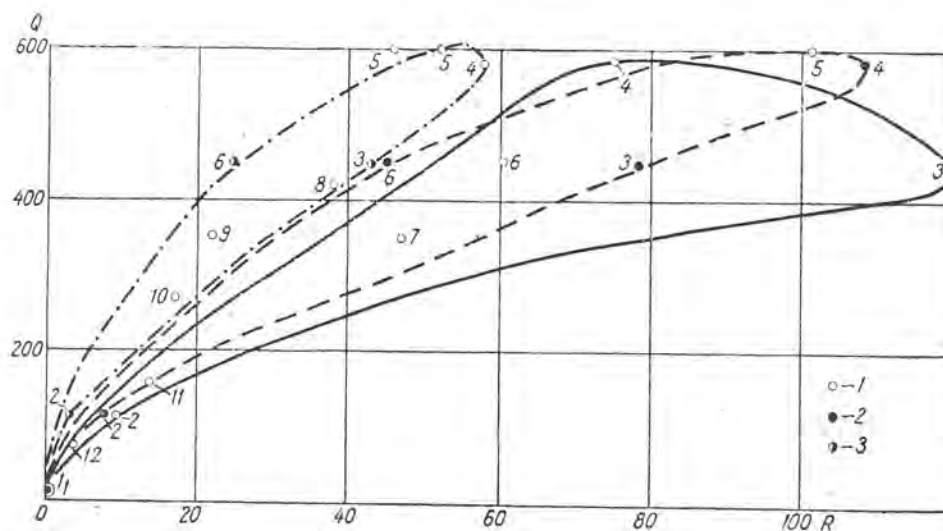


Figure 1. Relationship $R = f(Q)$, Kama River at the village of Volosnitskoe.

1. Measured discharges of suspended sediments.
2. Discharges of suspended sediments computed for d_e of 50%.
3. Discharges of suspended sediments computed for d_e of 10%.

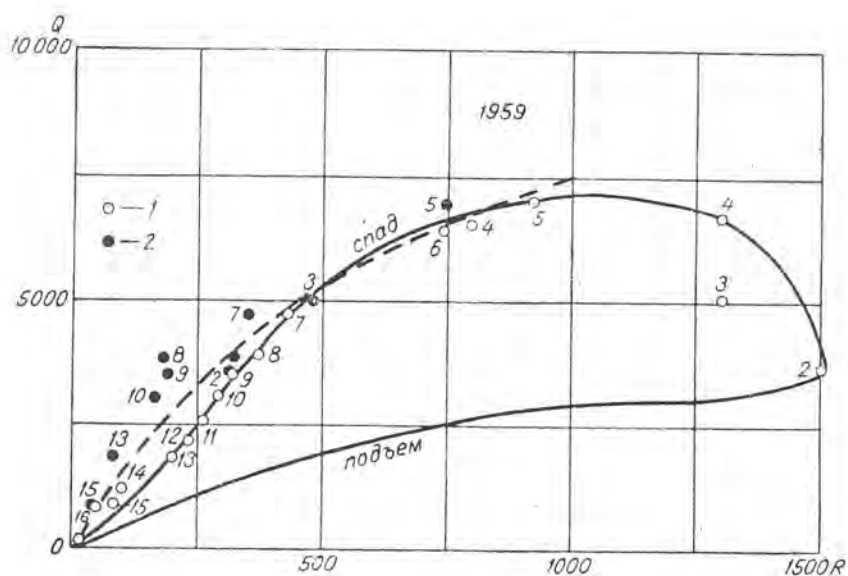


Figure 2. Relationship $R = f(Q)$, Belaia River at the city of Ufa.

1. Measured discharges of suspended sediments.
2. Computed discharges of suspended sediments.

Figure 4 illustrates the third type, characterized by a sufficiently complete coincidence of the observed values of R and those estimated from Formula (1) for all phases of the flow regime. This type has the property of a single-valued curve for the relationship $R = f(Q)$.

Figure 4 shows a graph for the Syr-Dar'ia River with very high turbidity values (up to $3,000 \text{ g/m}^3$) and a fine, rather homogeneous composition of soil. Table 3 shows that the majority of the rivers studied belong to the first group, when the most unfavorable period for calculation turns out to be the period of rising spring runoff. The erosion processes on the surface of the river basin and on the valley slopes form the sediment runoff of the rivers largely in this period. This cannot be allowed for in calculating the composition of the alluvial bed. The analysis of data from a series of plains rivers showed that a sharp increase in turbidity usually comes shortly after the date of minimum water discharge before spring runoff and ends about the date of maximum water discharge. Due to the complexity and multiplicity of factors involved in the process of forming the sediment flows during the period of rising spring runoff, at the present time it is still impossible to give reliable recommendations for calculating the turbidity during this period. Approximate calculations of turbidity for this phase of the riverflow regime may be obtained from formula (1) when, for estimating the hydromechanical sediment parameters (G), data from the grain sizes of this suspended sediment are used which are close to the composition of sediments washed from the basin. Such a method of calculation was

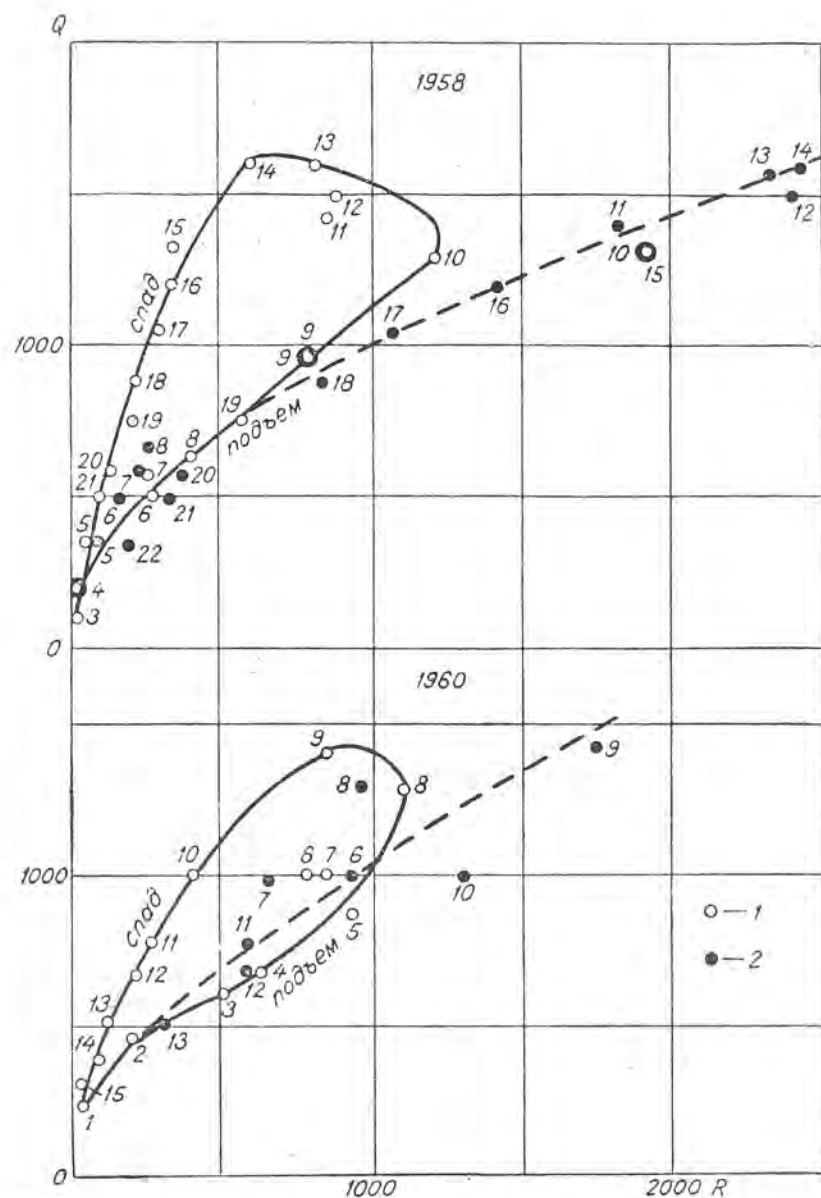


Figure 3. Relationship $R = f(Q)$ for the Ural River at the settlement of Topoli:

1. Measured discharges of suspended sediments
2. Computed discharges of suspended sediments

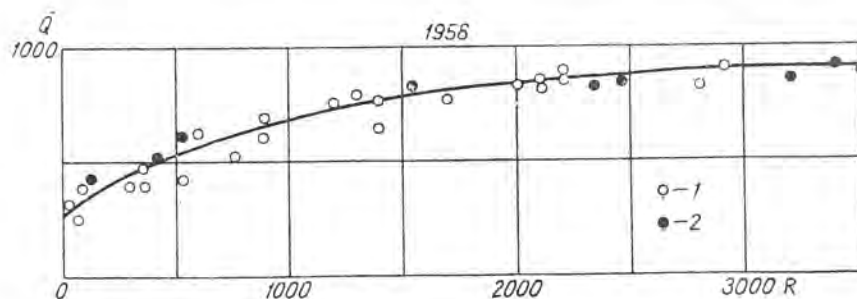


Figure 4. Relationship $R = f(Q)$ for the Syr-Dar'ia at the city of Kazalinsk. 1 and 2. Same as above.

Table 3

ANALYSIS OF THE RESULTS OF COMPARING ESTIMATED AND MEASURED DISCHARGES
OF SUSPENDED SEDIMENTS BY GROUPS OF THE RIVERS STUDIED

Group 1 Rivers	Group 2 Rivers	Group 3 Rivers
Estimated values are located on the falling branches of the curve $R_{\text{meas}} = f(Q)$, but are too low during the period of rising spring floodwaters. The character of the soil: gravelly-sandy with a grain size from 0.05 to 10 mm.	Estimated values of R are located on the rising part of the curve $R_{\text{meas}} = f(Q)$, but are too low for the period of falling floodwaters. The character of the soil: silty-sandy with a grain size from 0.01 to 1 mm.	Estimated values of R are located near the single-valued curvilinear relationship $R_{\text{meas}} = f(Q)$. The regime of the river is multiple floods and extended high water.
Belaia River at the city of Birs'k, 1958, 1959, 1960 Belaia River at the city of Ufa, 1959 Kama River at the village of Volosnitskoe, 1958, 1959, 1960 Siun' River at the settlement of Min'iarovo, 1959, 1960 Oka River at the city of Kaluga, 1963 Medveditsa River at the Archedinsk gaging station, 1960 Polomet' River at the village of Iazhelbitsy, 1963, 1965, 1967	Ural River at Topoli 1958, 1959, 1960 Sura River at the settlement of Trakhaniotovo 1961 Viatka River at the city of Kirov 1959, 1960 Penza River at the Ardysk Sovkhoz 4/ 1961 Don River at the Khovansk farm 1960 5/	Sur-Dar'ia River at the city of Kazalinsk Syr-Dar'ia River at the village of Kal' 6/ Polomet' River at Iazhelbitsy 1966

4/Translator's note: This acronym indicates a state farm as opposed to a collective farm. The sovkhov in USSR agriculture is a very large state-developed and -managed farm usually in virgin soil with villages, schools, hospital, manufacturing plants (like precast concrete products), social center, and administration buildings.

5/Translator's note: The abbreviation indicates a khutor, which in this area of the USSR indicates an agricultural workers' settlement consisting of several villages.

6/Translator's note: The abbreviation is for kishlak, a village or settlement in Central Asia.

verified for example on the Polomet' River (Reference 6). It is necessary to keep in mind that in this case the calculation gives somewhat higher values in comparison with the measured values.

According to the analysis conducted and verification of the accuracy of computing discharges of suspended sediment for various phases of the riverflow regime given in this paper, it is possible to formulate several recommendations and to determine the limits of applicability of Formula (1). For rivers, the flow regimes of which are characterized by sharply defined spring runoff, the results of estimating the discharge of suspended sediment from formulas (1) and (3) using the composition of the bottom deposits are different for the various phases of the flow regime in relation to the character of the materials deposited in the channel. Reliable results are obtained for periods of falling spring runoff and low water, if the river has gravelly-sandy channel deposits. Direct field measurements of turbidity are necessary in a period of rising spring runoff. Approximate calculations of turbidity may be obtained for this period for use in formula (1) for the grain size of suspended sediment.

Rivers having silty-sandy channels can be calculated by the stated formulas for the period of rising spring runoff. For falling spring runoff and summer low water, in this case, calculation by formula (1) does not give good results; therefore, for obtaining a description

of the magnitude of turbidity one should make use of data from analogous rivers, or perform control measurements on rivers, which possibly could be extrapolated by the theoretical formula.

For rivers with a multiple-flood regime or extended spring runoff which have a single-valued relationship $R = f(Q)$, the discharge of suspended sediment can be computed by formulas (1) to (3) using the composition of the bottom deposits for all ice-free periods of the year.

Table 4

CHARACTERISTIC COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS FOR THE
THREE GROUPS OF RIVERS

Diameter of particles d(mm) and their amount in percent by weight									
>10	10-5	5-2	2-1	1-0.5	0.5-0.2	0.2-0.1	0.1-0.05	0.05-0.01	<0.01
<u>Belaia River at the city of Ufa, 1959</u>									
21.9	14.1	11.1	4.1	11.8	32.1	2.9	0.3	1.6	
<u>Ural River at the city of Topoli, 1959</u>									
				0.2	19.3	37.7	16.8	20.0	6.0
<u>Syr-Dar'ia at the city of Kazalinsk, 1961</u>									
					16.2	39.1	27.5	10.5	6.3

Bibliography

1. Efremov, A. V. Results of testing the formulas for transport capacity of a stream. Trudy SANIIRI, Vol. 91, Tashkent, 1958
2. Karaushev, A. V. Hydraulics of rivers and reservoirs. Izdat "River transport," Leningrad, 1955
3. Karaushev, A. V. Problems of the dynamics of natural waterflows. Gidrometeoizdat, 1960
4. Makkaveev, V. M. Problems in the theory of turbulence and movement of sediment. Trudy GGI, Vol. 132, 1966
5. Razumikhina, K. V. Problems of the applicability of methods of calculating the transport of sediment to streams. Trudy GGI, Vol. 132, 1966
6. Razumikhina, K. V. Field investigations and calculation of sediment transport. Trudy GGI, Vol. 141, 1967
7. Shestakova, R. A. Determination of water discharge at the time of high level by the slope of the water surface and the coefficient C in Chezy's formula. Trudy GGI, Vol. 106, 1963.
8. Svartsman, A. Ia. Investigation and calculation of turbidity in the shore zone of reservoirs. Trudy GGI, Vol. 124, 1965.

ОПЫТ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РАСХОДОВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ РАВНИННЫХ РЕК

Введение

В связи с подготовкой норм технических указаний по расчету заиления водохранилищ в лаборатории наносов ГГИ выполнялась проверка применимости формул транспортирующей способности к речным потокам. В прежних работах автора [5, 6] рассматривались некоторые формулы и методы расчета. Ранее в САНИИРИ А. В. Ефремовым [1] выполнялись подобные проверочные расчеты по наиболее распространенным в то время формулам транспортирующей способности (формулы А. Н. Гостунского, Е. А. Замарина, А. Г. Хачатряна, С. Х. Абальянца и др.). С целью получения надежного исходного материала на каналах ирригационных систем Средней Азии и в лабораториях были организованы специальные исследования по изучению транспортирующей способности. На основании этих работ было установлено, что рассмотренные эмпирические формулы дают удовлетворительные результаты лишь для условий, близких к тем, для которых они получены. Формулы же М. А. Великанова, А. Н. Гостунского, С. Х. Абальянца, имеющие определенное теоретическое обоснование и весьма близкие друг к другу, как указывает А. В. Ефремов, не являются достаточно совершенными и при сопоставлении с измеренными величинами дают в большинстве случаев значительные отклонения.

В практике проектных организаций для расчетов заиления ирригационных каналов наибольшим распространением пользуются формулы Гостунского, Замарина и Абальянца. Однако применительно к речным потокам эти формулы в достаточной степени проверке не подвергались.

Выполненное автором [5] сопоставление измеренных и расчетных величин мутности показало, что для расчета транспортирующей способности рек в среднем сравнительно лучший результат получается по теоретическому методу А. В. Караушева [3], основная расчетная формула которого имеет вид

$$S_{\text{тр}} = S_{\text{взм}} \Gamma; \quad (1)$$

здесь $S_{\text{тр}}$ — средняя мутность потока, отвечающая его транспортирующей способности; Γ — гидромеханический параметр наносов, который в зависимости от способа задания состава наносов вычисляется либо по взвешиваемым фракциям донных отложений, либо по фракциям

взвешенных наносов и зависит от ряда факторов, в том числе от состава наносов, скорости потока, коэффициента Шези; $S_{\text{взм}}$ — мутность взмыва, определяемая по формуле

$$S_{\text{взм}} = 150N \frac{v_n^2}{H}, \quad (2)$$

где v_n — донная скорость потока, H — средняя глубина, N — безразмерное характеристическое число, являющееся функцией коэффициента Шези C .

Расход взвешенных наносов R_s выражается формулой

$$R_s = S_{\text{тр}} Q, \quad (3)$$

где Q — расход воды.

Основным преимуществом рассматриваемого метода перед формулами упомянутых выше авторов является возможность детального учета гранулометрического состава наносов, причем для учета фракционного состава транспортируемых наносов и учета состава донных отложений, как отмечено, применяются различные соотношения. Проверка по натурным данным, относящимся к речным потокам, позволила установить, что наилучший результат дает тот вариант формулы (1), который предполагает вычисление гидромеханического параметра наносов Γ по составу донных отложений.

Ниже будет детально рассмотрено применение формулы (1) к речным потокам. Предварительно, однако, оказалось необходимым уточнить вопрос о вычислении коэффициента Шези C , весьма значительно влияющего на транспортирующую способность потока.

Выбор размера частиц наносов, характеризующих зернистую шероховатость русла

В литературе излагается ряд способов определения коэффициента Шези C в зависимости от относительной шероховатости русла. Одной из наиболее обоснованных зависимостей при этом является формула Штриклера [2, 4] (см. также статью В. М. Маккавеева в настоящем сборнике). Формула Штриклера с введенным в нее уточненным коэффициентом [2] имеет вид

$$C = 33 \left(\frac{H}{d_s} \right)^{1/6},$$

H — средняя глубина в м; d_s — эффективная крупность донных отложений в мм, определяющая зернистую шероховатость русла.

Величина эффективного диаметра донных отложений принимается различной в зависимости от характера грунта, слагающего русло потока. Так, А. Я. Шварцман [8] для прибрежной зоны водохранилища рекомендует в качестве эффективного принимать диаметр донных отложений, ограничивающий на интегральном графике гранулометрического состава донных отложений 10% крупных наносов. Для р. Поломь автором установлено, что эффективным диаметром донных отложений является диаметр частицы, отвечающий по величине 50%-ной обеспеченности на гранулометрической кривой [6]. В дальнейшем были использованы материалы наблюдений по ряду других равнинных рек. В табл. 1 представлены результаты определения коэффициента C по формуле Шези (при наличии измеренных уклонов) и по интерполяционному методу Р. А. Шестаковой [7]. Параллельно сделаны вычисления величины C по формуле Штриклера с использованием в качестве эффективного диаметра разме-

ров частиц 10- и 50%-ной обеспеченности из состава донных отложений. Из табл. 1 видно, что наилучший результат получается при вычислении коэффициента по эффективному диаметру, полученному по 50%-ной обеспеченности состава отложений. Этот вывод справедлив для рек с гравелисто-песчаным руслом, крупность отложений которых находится в пределах от 0,05 до 10—20 мм, с преобладающими фракциями 1—0,5 и 0,5—0,2 мм.

Таблица 1

Значения коэффициентов Шези C , полученных по различным формулам (средние за половодье)

Река—пункт	Год	$C = \frac{v}{\sqrt{HI}}$	по данным Шестаковой	$C = 33 \left(\frac{H}{d_s} \right)^{1/4}$	
				$d_{э} 50\%$	$d_{э} 10\%$
Ужа — Мантурово	1961		40,8	43,0	31,6
	1962		40,8	38,9	29,6
	1963		40,8	46,6	31,1
Мокша — Темников	1962	39,3		38,7	33,9
	1963	38,6		37,0	33,1
Молома — Щетищенки	1958	42,4		40,8	31,0
	1961		40,8	39,8	28,8
	1962		40,8	45,0	37,7
Быстрица — Шипицыно	1963		40,8	42,6	35,8
	1963		41,6	37,1	33,2
Кама — Тарловка	1958	55,3		57,0	31,8
Кама — Сарапул	1958	42,2		42,0	29,6
Обва — Карачай	1958	40,0		39,7	22,5

Состав донных отложений рассмотренных рек представлен в табл. 2. Дополнительная контрольная проверка некоторых значений C , вычисленных при разных величинах d_s , была выполнена путем сопоставления вычисленных и измеренных расходов наносов R . На рис. 1 показано, что

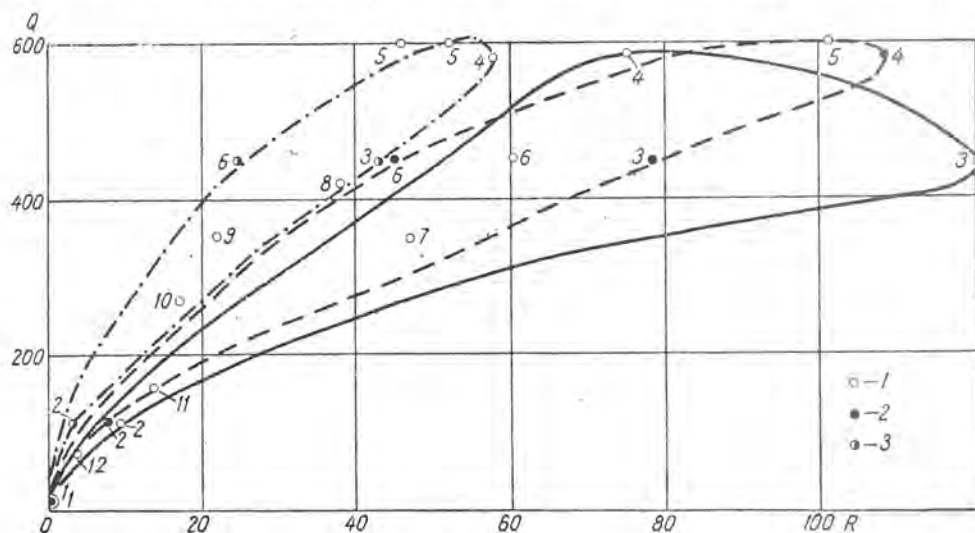


Рис. 1. Зависимость $R=f(Q)$, р. Кама — с. Волосинское.

1 — измеренные расходы взвешенных наносов; 2 — то же, вычисленные при $d_{э} 50\%$; 3 — то же, вычисленные при $d_{э} 10\%$.

при определении C по эффективному диаметру d_{50} 50%-ной обеспеченности совпадение $R_{\text{выч}}$ и $R_{\text{изм}}$ оказывается гораздо лучше, чем при использовании для вычисления C d_{10} 10%-ной обеспеченности. При этом наиболее существенная разница прослеживается при высоких значениях расходов воды и наносов.

Таблица 2

Гранулометрический состав донных отложений

Река—пункт	Год, дата	Диаметр частиц d (мм) и их содержание (в % по весу)								
		10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,2	0,2—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	<0,01
Ужга — Мантурово	1961, 31/III	3,3	11,4	4,6	32,1	43,0	2,8	0,5	2,3	
	1962, 20/VI	17,1	11,9	8,4	25,1	26,9	1,5	0,4	8,7	
	1963, 8/IV	18,9	5,8	8,2	37,7	22,1	4,6	0,7	2,0	
Мокша — Темников	1961, 23/IV	0,5	0,5	2,9	28,0	46,8	15,5	1,6	4,1	
	1962, 3/V	0,1	0,2	2,0	26,1	55,2	9,1	0,9	6,4	
	1963, 25/III		0,7	3,6	43,6	42,0	7,2	0,6	2,3	
Молома — Щетиненки	1961, 7/IV	7,7	11,7	10,8	48,8	16,5	2,5	0,3	1,6	
	1962, 14/IX	6,6	12,4	16,7	33,5	28,2	1,3	0,2	1,1	
	1963, 27/IV	1,5	3,7	9,0	38,6	28,8	4,4	3,9	5,2	5,0
Быстрица — Шипицыно Кама — Волосницкое	1963 13/IV	5,2	2,3	1,8	38,4	47,1	2,3	0,5	2,3	
	1958	25,1	10,0	3,7	28,1	19,5	2,4	11,0		
	1959	28,0	7,0	5,0	37,1	14,0	1,6	7,0		
	1960	24,1	8,0	4,0	32,7	21,7	1,6	8,1		

Расчет расходов наносов по фазам водного режима рек

Для решения вопроса о применении теоретического метода [3] к расчету расходов наносов при различных фазах водного режима рек использованы наиболее надежные и полные данные натуральных измерений. Были выбраны несколько створов равнинных рек, находящихся в разных природных условиях: р. Белая — г. Бирск, р. Белая — г. Уфа, р. Кама — с. Волосницкое, р. Ока — г. Калуга, р. Ока — д. Новинки, р. Дон — х. Хованский, р. Дон — ст-ца Казанская, р. Медведица — ст-ца Арчединская, р. Урал — д. Тополи, р. Вятка — г. Киров, р. Сура — с. Траханиотово, р. Сунь — д. Миньярово, р. Поломь — с. Яжелбицы и др. Эти реки имеют четко выраженную, большей частью одновершинную волну весеннего половодья. Таким типом гидрографа характеризуется подавляющая часть равнинных рек СССР. Связь измеренных расходов воды и взвешенных наносов выражается обычно для рек такого типа одной петлеобразной кривой, правая ветвь которой отвечает периоду увеличения водности и мутности (подъем половодья), а левая — периоду уменьшения этих элементов (спад половодья). Кроме того, в качестве примера среднеазиатских рек с высокой мутностью были использованы материалы по р. Сыр-Дарье, которая характеризуется многопаводочным режимом. Связь расходов воды и взвешенных наносов для рек такого типа обычно характеризуется однозначной криволинейной зависимостью с некоторым разбросом точек.

Сопоставление с натурными данными результатов расчета расходов взвешенных наносов по мутности, вычисленной при использовании фор-

мулы (1), показало, что для равнинных рек необходимо конкретизировать подход к расчету для разных фаз водного режима реки.

Анализ расположения на графиках связи $R=f(Q)$ расчетных точек позволил разделить все рассмотренные реки на три группы (табл. 3). Выяснилось, что эти группы различаются по гранулометрическому составу донных отложений. Характерный состав донных отложений для рек этих групп приведен в табл. 4. Для рек первой группы расчетные точки располагаются на ветви спада. Сюда относятся реки с гравелисто-песчаным составом донных отложений крупностью от 0,05 до 10—20 мм и преобладающими в процентном отношении фракциями от 0,2 до 1 мм. На рис. 2 показан пример такого расположения измеренных и

Таблица 3

Систематизация результатов сравнения вычисленных и измеренных расходов взвешенных наносов по группам рассмотренных рек

1 группа рек. Вычисленные величины ложатся на ветвь спада на графике $R_{изм}=f(Q)$, но занижены для периода подъема весеннего половодья. Характер грунта: гравелисто-песчаный, крупность от 0,05 до 10 мм	2 группа рек. Вычисленные величины R ложатся на ветвь подъема на графике $R_{изм}=f(Q)$, но завышены для периода спада половодья. Характер грунта: илисто-песчаный, крупность от 0,01 до 1 мм	3 группа рек. Вычисленные величины R ложатся вблизи однозначной криволинейной зависимости $R_{изм}=f(Q)$. Режим рек многопаводочный, половодье растянутое
р. Белая — г. Бирск 1958, 1959, 1960 гг. р. Белая — г. Уфа 1959 г. р. Кама — с. Волосническое 1958, 1959, 1960 гг. р. Сюнь — д. Миньярово 1959, 1960 гг. р. Ока — г. Калуга 1963 г. р. Медведица — ст-ца Арчединская 1960 г. р. Полометь — с. Яжелбицы 1963, 1965, 1967 гг.	р. Урал — Тополи 1958, 1959, 1960 гг. р. Сура — д. Траханиотово, 1961 г. р. Вятка — г. Киров, 1959, 1960 г. р. Пенза — свх Ардымский 1961 г. р. Дон — х. Хованский 1960 г.	р. Сыр-Дарья — г. Казалинск р. Сыр-Дарья — кнзл. Каль р. Полометь — Яжелбицы 1966 г.

Таблица 4

Характерный состав донных отложений для трех групп рек

Диаметр частиц d (мм) и их содержание (и % по весу)									
>10	10—5	5—2	2—1	1—0,5	0,5—0,2	0,2—0,1	0,1—0,05	0,05—0,01	<0,01
р. Белая — г. Уфа, 1959 г.									
21,9	14,1	11,1	4,1	11,8	32,1	2,9	0,3	1,6	
р. Урал — г. Тополи, 1959 г.									
				0,2	19,3	37,7	16,8	20,0	6,0
р. Сыр-Дарья — г. Казалинск, 1961 г.									
					16,2	39,1	27,5	10,5	6,3

вычисленных величин R . Как видно, из графика, точки 2, 3, 4, отвечающие периоду начала весеннего половодья, имеют наибольшие отклонения от натурной кривой. Вычисленные расходы наносов в этот период оказываются заниженными по сравнению с измеренными в 2—3 раза. Начиная с точки 5, отвечающей максимальному расходу воды, и далее на участке спада половодья расхождения эти резко снижаются, обнаруживая почти полное соответствие измеренных и вычисленных величин.

На рис. 3 представлен второй тип соотношения вычисленных и измеренных расходов взвешенных наносов, когда расчетные величины R располагаются на ветви подъема весеннего половодья, а на спаде половодья вычисленные величины оказываются завышенными. К такому типу

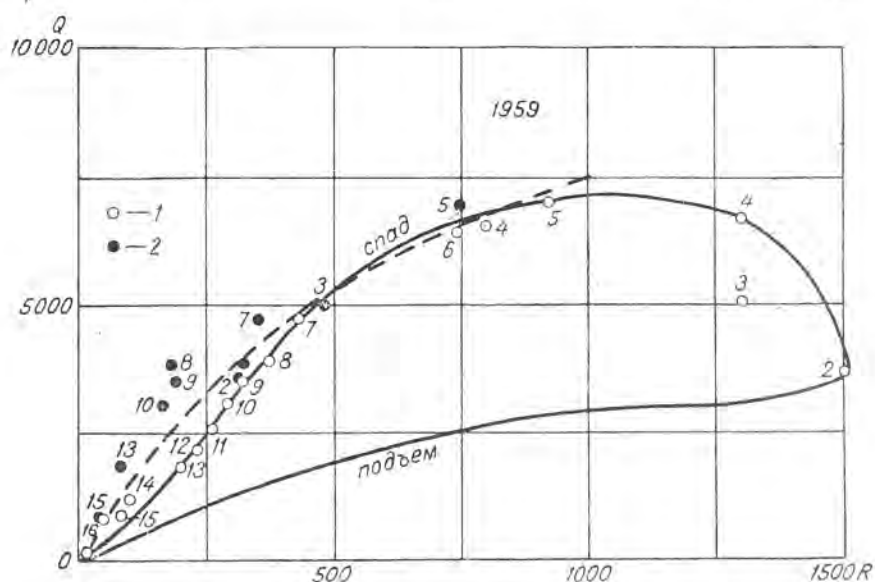


Рис. 2. Зависимость $R=f(Q)$, р. Белая — г. Уфа.

1 — измеренные расходы взвешенных наносов, 2 — то же, вычисленные.

относятся реки с руслом, сложенным илесто-песчаным аллювием крупностью от 0,001 до 1 мм и с преобладающими в процентном отношении фракциями от 0,2 до 0,05 мм.

Рисунок 4 иллюстрирует третий тип, характеризующийся достаточно полным совпадением наблюдаемых и вычисленных по формуле (1) величин R для всех фаз водного режима. Для этого типа свойственна однозначная кривая связи $R=f(Q)$. На рис. 4 показан график для р. Сыр-Дарыя, отличающейся очень высокими значениями мутности (до 3000 г/м³) и мелким, довольно однородным составом грунтов. Как видно из табл. 3, большинство рассмотренных рек относится к 1-ой группе, когда наиболее неблагоприятным периодом для расчета оказывается период подъема весеннего половодья. Формирование стока наносов рек осуществляется в этот период в значительной степени за счет эрозийных процессов на поверхности бассейна реки и на склонах долины, что не может быть учтено при расчете по составу руслового аллювия. Анализ материалов по ряду равнинных рек показывает, что резкое увеличение мутности обычно наступает вскоре после даты минимального расхода воды перед половодьем, а конец его обычно связан с датой максимального расхода воды. В связи со сложностью и многообразием факторов,

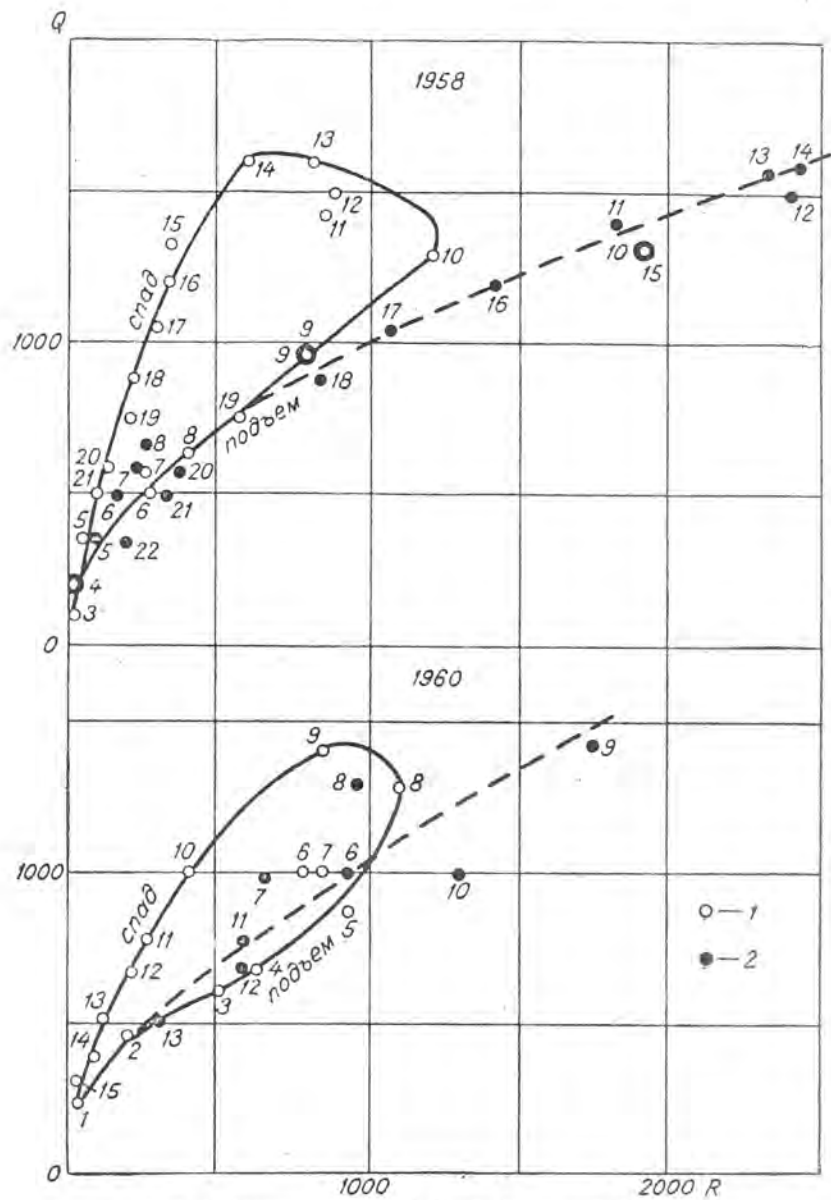


Рис. 3. Зависимость $R=f(Q)$, р. Урал — д. Тополи.
Усл. обозначения см. на рис. 2.

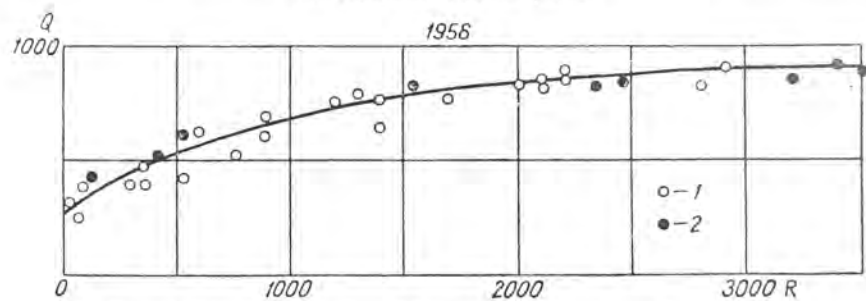


Рис. 4. Зависимость $R=f(Q)$, р. Сыр-Дарья — г. Казалинск.
Усл. обозначения см. на рис. 2.

участвующих в процессах формирования стока наносов в период подъема весеннего половодья, пока еще не представляется возможным дать надежные рекомендации по расчету мутности в этот период. Приближенный расчет мутности для этой фазы водного режима реки можно выполнять по формуле (1), когда для вычисления гидромеханического параметра наносов (Γ) используются данные по крупности взвешенных наносов, близких по составу и наносам, смываемым с бассейна. Такой прием расчета проверен на примере р. Полометь [6]. Следует, однако, иметь в виду, что в этом случае расчет даст некоторое завышение по сравнению с измеренными величинами.

Согласно проведенному анализу и полученным в настоящей статье результатам проверки точности расчета расходов взвешенных наносов для отдельных фаз водного режима рек, можно сформулировать некоторые рекомендации и определить пределы применимости формулы (1). Для рек, водный режим которых характеризуется четко выраженным весенним половодьем, результаты вычисления расходов взвешенных наносов по формулам (1) — (3) при использовании состава донных отложений получаются различными для разных фаз водного режима в зависимости от характера отложений, слагающих русло. Надежные результаты получаются для периода спада весеннего половодья и межени, если река имеет гравелисто-песчаный характер русловых отложений. В период подъема половодья в этом случае необходимо иметь непосредственные натурные измерения мутности. Приближенные расчеты мутности могут быть получены для этого периода при использовании формулы (1) по крупности взвешенных наносов.

Для рек, имеющих илисто-песчаное русло, расчет по указанной формуле может выполняться для периода подъема. Для спада половодья и летней межени в указанном случае расчет по формуле (1) не даст хорошего результата, поэтому для получения представления о величине мутности следует пользоваться данными по рекам-аналогам, либо выполнять контрольные измерения на реке, которые могли бы быть экстраполированы по теоретической формуле.

Для рек с многопаводочным режимом или растянутым весенним половодьем, имеющих однозначную зависимость $R=f(Q)$, расчет расходов взвешенных наносов по формулам (1) — (3) с использованием состава донных отложений может выполняться для всего безледоставного периода года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов А. В. Результаты проверки формул транспортирующей способности потока. Тр. САНИИРИ, вып. 91, Ташкент, 1958.
2. Караушев А. В. Гидравлика рек и водохранилищ. Изд. «Речной транспорт», Л., 1955.
3. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеопиздат, 1960.
4. Маккаеев В. М. Вопросы теории турбулентности и движения наносов. Тр. ГГИ, вып. 132, 1966.
5. Разумихина К. В. Вопросы применимости методов расчета транспорта наносов к речным потокам. Тр. ГГИ, вып. 132, 1966.
6. Разумихина К. В. Натурное исследование и расчет транспорта наносов. Тр. ГГИ, вып. 141, 1967.
7. Шестакова Р. А. Определение расходов воды при высоких уровнях по уклону водной поверхности и коэффициенту C формулы Шези. Тр. ГГИ, вып. 106, 1963.
8. Шварцман А. Я. Исследование и расчет мутности в прибрежной зоне водохранилища. Тр. ГГИ, вып. 124, 1965.

5-1

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Т Р У Д Ы

ВЫПУСК 156

ENGLISH TABLE OF CONTENTS
ON BACK COVER

РЕЖИМ, ТЕОРИЯ,
МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ИЗМЕРЕНИЯ
НАНОСОВ И СТОЧНЫХ ВОД



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1968

