

## ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ РАСХОДА ДОННЫХ НАНОСОВ В РЕКАХ

Самохвалова О.А.

*ФГБУ «Государственный гидрологический институт», 199053, Россия, Санкт-Петербург, В.О., 2-я линия, 23, e-mail: riverchannel@yandex.ru*

Статья посвящена проблеме расчета расхода донных наносов в реках. Для решения указанной проблемы предлагается использовать так называемый дифференцированный подход. В соответствии с этим подходом реки были разделены на группы: большие равнинные, малые и средние равнинные, а также горно-предгорные, – отдельно выделен грядовый транспорт на горных реках. Каждой группе транспорта донных наносов подобран свой массив данных измерений расхода донных наносов, полевых или лабораторных. Собраны и проанализированы формулы расчета расхода донных наносов (134 формулы). На основе имеющихся данных отдельно для каждого типа транспорта проверена достоверность формул и даны рекомендации по расчету расхода донных наносов с погрешностью в 2 раза. Для больших равнинных рек рекомендованы формулы З.Д. Копалиани и Л.Д. Когана — В.П. Углова, для малых и средних равнинных – формулы Б.Ф. Снисченко — З.Д. Копалиани и А.Н. Бутакова, для грядового транспорта на горно-предгорных реках формулы А.А. Костюченко — З.Д. Копалиани и В.Н. Лазарева — Ф.М. Чернышова, для бесструктурного транспорта на горных реках – зависимости Л.Г. Гвелесиани, И.И. Леви и Г.И. Шамова.

Ключевые слова: расход донных наносов, равнинные реки, горно-предгорные реки, большие реки, малые реки, средние реки, грядовый транспорт донных наносов, бесструктурный транспорт донных наносов, рекомендации по расчету транспорта донных наносов

## SELECTIVE APPROACH FOR BEDLOAD DISCHARGE CALCULATIONS IN RIVERS

Samokhvalova O.A.

*State Hydrological Institute, 199053, Russia, Saint-Petersburg, V.O., 2nd Line, 23, e-mail: riverchannel@yandex.ru*

The article deals with the calculation of bedload transport in rivers. To solve this problem, we propose to use the so-called selective methodology. In accordance with this approach rivers were divided into the following groups: large plain, small and middle-size plain and mountain-piedmont, - separately dunes transport on the mountain rivers was considered. For each group of bedload transport we selected appropriate dataset of field or laboratory bedload measurements. We collected and analyzed the formulae for bedload calculation (134 formulae). Based on the data available the reliability of the formulas was assessed and recommendations for bedload calculation with an accuracy of 2 times were given for each type of bedload transport. For large lowland rivers formulae by Z.D. Kopaliani and L.D. Kogan and V.P. Uglov were recommended, for small and meddle-sized plain rivers – formulae by B.F. Snischenko-Z.D. Kopaliani and A.N. Butakov, for dunes transport on mountain and piedmont rivers formulae by A.A. Kostyuchenko-Z.D. Kopaliani and V.N. Lazarev-F.M. Chernishov, for nonstructural transport in mountain rivers – formulae by L.G. Gveliesiani, I.I. Levy and G.I. Shamov.

Keywords: bedload transport, plain rivers, mountain-piedmont rivers, large rivers, small rivers, middle-size rivers, dunes transport in rivers, nonstructural bedload transport, recommendations for bed load transport calculations.

Проблема расчета расхода донных наносов в реках – одна из наиболее важных, сложных и до сих пор не решенных задач в теории руслового процесса. К настоящему времени создано несколько сотен формул, но на практике они дают результаты, отличающиеся друг от друга и данных наблюдений в десятки, сотни и более раз. Такое положение дел отрицательно сказывается на решении многочисленных инженерных задач на реках, требующих расчетов этой характеристики. Поэтому в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) была предпринята попытка систематизировать имеющиеся формулы расчета расхода донных наносов и дать конкретные рекомендации по

его расчету для различных природных условий. Общепринято, что удовлетворительной на сегодня можно считать точность расчета расхода донных наносов в 1,5–2 раза [4].

Причины неудовлетворительного состояния этого вопроса подробно рассмотрены в статье З.Д. Копалиани и А.А. Костюченко [7]. Основные из них: отсутствие однозначного определения понятия «донные наносы», отсутствие общепринятых методов разграничения влекомых, сальтирующих и взвешенных наносов, недостаточный учет специфики природных условий рек, в которых происходит транспорт донных наносов (их размера, уклона, гранулометрического состава, форм транспорта донных наносов), низкая точность зависимостей, используемых для расчетов сдвига частиц донных отложений, и пр.

Можно выделить четыре подхода к получению формул расхода донных наносов:

- универсальный подход (авторы подразумевают, что формула имеет неограниченное применение) – формулы И.И. Леви (1957) [3], Г.И. Шамова (1952) [14], Х.А. Эйнштейна (1950) [16];
- дифференцированный подход (каждому типу гидравлико-морфологических условий подбираются свои формулы);
- разработка региональных зависимостей (обобщения для рек определенного типа, региона, например для горных рек Средней Азии – формула Р.В. Тимировой и З.А. Классен (1970) [12] или формула В.В. Ромашина (1990) для рек Черноморского побережья Краснодарского края [13]);
- вывод локальных зависимостей – для конкретного участка определенной реки.

Время показало, что в силу сложности, многофакторности и слабой изученности процесса транспорта донных наносов универсальный подход пока не оправдывает своего назначения. Дифференцированный подход, разрабатываемый в Отделе русловых процессов (ОРП) ГГИ, подразумевает разделение задачи расчета транспорта донных наносов в зависимости от природных условий на типы и подбор для каждого типа наиболее подходящих формул. В рамках дифференцированного подхода мы выделили следующие типы транспорта донных наносов:

- транспорт донных наносов на больших равнинных реках – в форме гряд;
- транспорт донных наносов на малых и средних равнинных реках – в форме гряд;
- грядовый транспорт на горно-предгорных реках;
- бесструктурный транспорт на горно-предгорных реках.

#### **Особенности транспорта донных наносов на равнинных реках**

Транспорт донных наносов на равнинных реках имеет свои особенности:

- движение наносов при установившемся движении воды происходит в форме гряд (соблюдается условие  $\frac{H}{d} > 30$ );

- гранулометрический состав песчаных наносов относительно однороден, поэтому в качестве характерного часто используется средневзвешенный диаметр  $d$ .

Расход донных наносов на единицу ширины русла при грядовом перемещении наносов рассчитывается по следующей формуле:

$$q_T = \alpha h_T C_T$$

$q_T$  – расход донных наносов на единицу ширины русла в рыхлом теле, м<sup>3</sup>/с/м,

$\alpha$  – коэффициент формы гряды, в среднем равный 0,6,

$h_T$  – высота гряды,

$C_T$  – скорость перемещения гряды.

Таким образом, располагая надежными формулами для расчета высоты гряд  $h_T$  и скорости их движения  $C_T$ , можно рассчитать расход донных наносов при грядовой форме их перемещения [10, 11].

### Особенности транспорта донных наносов на горно-предгорных реках

Транспорт наносов на горных реках отличается рядом особенностей:

- транспорт донных наносов имеет прерывистый характер и происходит лишь в периоды повышенной водности (половодья, паводка), а не в течение всего года, как на равнинных реках;

- гранулометрический состав донных наносов горных рек разнороден, поэтому частицы разных фракций донных отложений в зависимости от водности приходят в движение не одновременно.

Поэтому

- измерение расхода донных наносов на горной реке в межень не имеет смысла, а в многоводный период невозможно (скорости течения достигают 8 м/с, паводки труднопрогнозируемы, кратковременны и часто происходят в ночное время);

- наиболее надежный способ оценки транспорта наносов на горных реках сегодня – его физическое моделирование. Горный поток может быть воспроизведен в лаборатории без нарушения всех критериев его подобия, без искажения масштабов зернистой шероховатости.

На горных реках гряды формируются при следующих условиях [9]:

- при гранулометрическом составе, близком к однородному – случай срыва русловой отмостки ( $\frac{d_{20}}{d_{40}} \leq 4$ ):  $\frac{H}{d_{20}} > 15 \dots 17$ ,  $\frac{V}{V_0} < 4 \dots 6$ ;

- при разнородном гранулометрическом составе –  $\frac{H}{d} \geq 30$ ,  $\frac{V}{V_0} < 4 \dots 6$ .

## Расчетные формулы

Все формулы для расхода донных наносов получены на основе некоторых теоретических соображений и эмпирических данных полевых или лабораторных (размываемых гидравлических моделей или лотков), хотя те из них, которые носят обобщающий характер, часто называются теоретическими.

Все известные формулы мы разбили на определенные типы.

- Формулы, полученные для грядового движения  $q_T = \alpha h_T C_T$  – 50 формул.

- Формулы, полученные без учета грядового движения донных наносов – 84 формулы.

○ Основан на критерии начала движения. В качестве последнего используются:

- 1) критическая скорость потока  $q_T = f(V_0)$  – 18 формул;
- 2) критический расход воды  $q_T = f(q_0)$  – 7 формул;
- 3) критическое касательное напряжение на дне потока  $q_T = f(\tau_0)$  – 35 формул;
- 4) критический энергетический уклон  $q_T = f(I_0)$  – 1 формула.
  - Вероятностный подход  $q_T = f(P)$  – 4 формулы.
  - Регрессионные зависимости  $q_T = f(x, y, \dots)$  – 19 формул.

- Региональные зависимости  $Q_T = f(Q \text{ или } V)$ .

- Локальные зависимости  $Q_T = f(Q \text{ или } V)$ .

Разработка локальных зависимостей требует нескольких лет наблюдений на речном участке и целесообразна при строительстве дорогостоящих гидротехнических сооружений типа плотин.

## Эмпирический материал и методы исследования

Без учета региональных и локальных зависимостей нами были проверены 134 формулы для расхода донных наносов. Основой для сравнения послужил большой массив данных, полевых и лабораторных, собранных ОРП за многие годы. Массив данных состоит из трех блоков:

- по равнинным рекам: большим, малым и средним – данные полевых измерений (в основном данные ОРП);

- по грядовому транспорту на горно-предгорных реках – данные лабораторных лотков и гидравлических моделей (данные ОРП, советских и зарубежных авторов);

- по бесструктурному транспорту на горно-предгорных реках – данные лабораторных лотков (данные ОРП).

Формулы, полученные без учета гряд, проверялись на всем массиве данных, формулы для грядового движения – только для первых двух блоков.

### Данные измерений по равнинным рекам

Основой для сравнения формул в рамках данного типа послужил массив данных, собранных ОРП в течение многих лет в рамках экспедиций на большие, малые и средние реки СССР [10, 11], а также данные японских авторов по р. Хии [19]. Массив данных состоит из 200 измерений. Все данные получены на единой методической основе методом повторного продольного эхолотирования речного русла. При этом данные измерений высоты и скорости перемещения гряд представляют собой не осредненные характеристики на участке эхолотирования, а данные по конкретным грядам установившегося профиля, геометрические (высота, длина) и динамические (скорость перемещения) характеристики которых в процессе производства измерений остаются постоянными. Гидравлические и морфометрические характеристики измерений приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд в использованных натуральных исследованиях

Характеристика	Диапазон изменения			
	Большие реки (105 измерений)		Малые и средние реки (95 измерений)	
	min	max	min	max
Глубина потока $H$ , м	2,90	13,7	0,20	5,40
Скорость потока $V$ , м/с	0,72	2,10	0,45	1,76
Крупность донных отложений $d$ , мм	0,30	2,90	0,26	7,50
Уклон водной поверхности $I$	0,000069	0,000195	0,000270	0,001660
Высота гряд $h_r$ , м	0,31	1,75	0,0145	1,00
Длина гряд $l_r$ , м	15,0	120	0,79	21,0
Скорость перемещения гряд $C_r$ , м/сут	0,96	55,0	12,0	146
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	0,09	0,19	0,13	0,50
$\frac{H}{d}$	3897	38571	144	8269

$\frac{h_r}{H}$	0,07	0,20	0,07	0,54
$\frac{h_r}{d}$	328	4861	10,1	3704

Из таблицы следует, что равнинные реки спокойные (число Фруда значительно меньше единицы), размер наносов на малых реках больше, гряды на малых реках движутся значительно быстрее, гладкость потока велика.

#### Данные измерений по горно-предгорным рекам

#### Данные по грядовому транспорту

В качестве исходного материала для данного типа были взяты данные 6 лотковых экспериментов и 4 размываемых гидравлических моделей участков горно-предгорных рек (данные ОРП ГГИ [5], а также В.Н. Гончарова [2], В.Ф. Пушкарева [8], Г.П. Уильямса [20] и Х.П. Гая, Д.Б. Саймонса и И.В. Ричардсона [15]). Массив данных включал 220 измерений. В рассматриваемых экспериментах гранулометрический состав донных отложений был однородными ( $\frac{d_{70}}{d_{10}} \leq 4$ ). Гидравлические и морфометрические характеристики измерений приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

Диапазон изменения гидравлических характеристик потока и песчаных гряд в использованных лабораторных исследованиях

Характеристика	Диапазон изменения	
	min	max
Глубина потока $H$ , м	0,020	0,338
Скорость потока $V$ , м/с	0,35	1,45
Крупность донных отложений $d$ , м	0,0006	0,0065
Уклон водной поверхности $I$	0,0004	0,0101
Число Фруда $Fr = \frac{V}{\sqrt{gH}}$	0,34	1,26
Высота гряд $h_r$ , м	0,005	0,104
Длина гряд $l_r$ , м	0,18	2,71
Скорость перемещения гряд $c_r$ , м/с	0,00015	0,0376

$\frac{H}{d}$	9	364
$\frac{h_r}{H}$	0,08	0,56
$\frac{h_r}{d}$	1,2	111,4

Сравнение относительных показателей таблиц 1 и 2 говорит, что горные потоки более бурные, гладкость потока ниже, относительная высота гряды примерно такая же, гряды горных потоков формировались значительно меньшим количеством частиц, чем на равнинных реках.

### Данные по бесструктурному транспорту

Исходным материалом послужили данные трех серий экспериментов, проведенных в Руслевой лаборатории ГГИ (25 измерений расхода донных наносов). Прототипами для первых двух экспериментов послужили два участка р. Мзымты (Черноморское побережье Северного Кавказа) (8-метровый гидравлический лоток) [18], а для третьей серии экспериментов – участок русла р. Туапсе (100-метровый гидравлический лоток) [7].

Основные гидравлические характеристики экспериментов менялись в следующих пределах:

- первый эксперимент:  $I = 0,0074$ ;  $0,58 \leq Fr \leq 1,02$ ;  $3 \leq \frac{H}{d_{90}} \leq 13$ ;
- второй эксперимент:  $I = 0,013$ ;  $0,84 \leq Fr \leq 1,13$ ;  $5 \leq \frac{H}{d_{90}} \leq 16$ ;
- третий эксперимент:  $0,0045 \leq I \leq 0,0047$ ;  $0,46 \leq Fr \leq 0,87$ ;  $5 \leq \frac{H}{d_{90}} \leq 30$ .

Гранулометрический состав в первой и третьей сериях экспериментов был неоднородным, во второй серии — однородным.

Особенностью первых двух экспериментов явилось определение гранулометрического состава (грансостава) донных наносов на каждой стадии экспериментов (фазе моделируемого паводка). Это позволило проследить изменение грансостава наносов по ходу паводка и его отличие от исходного состава донных отложений. На рисунках 1 и 2 представлены кривые грансоставов донных наносов на каждой стадии паводка вместе с исходными кривыми донных отложений. Кривые второго эксперимента на всех стадиях очень близки к исходной, в первом эксперименте разброс значительно больший.

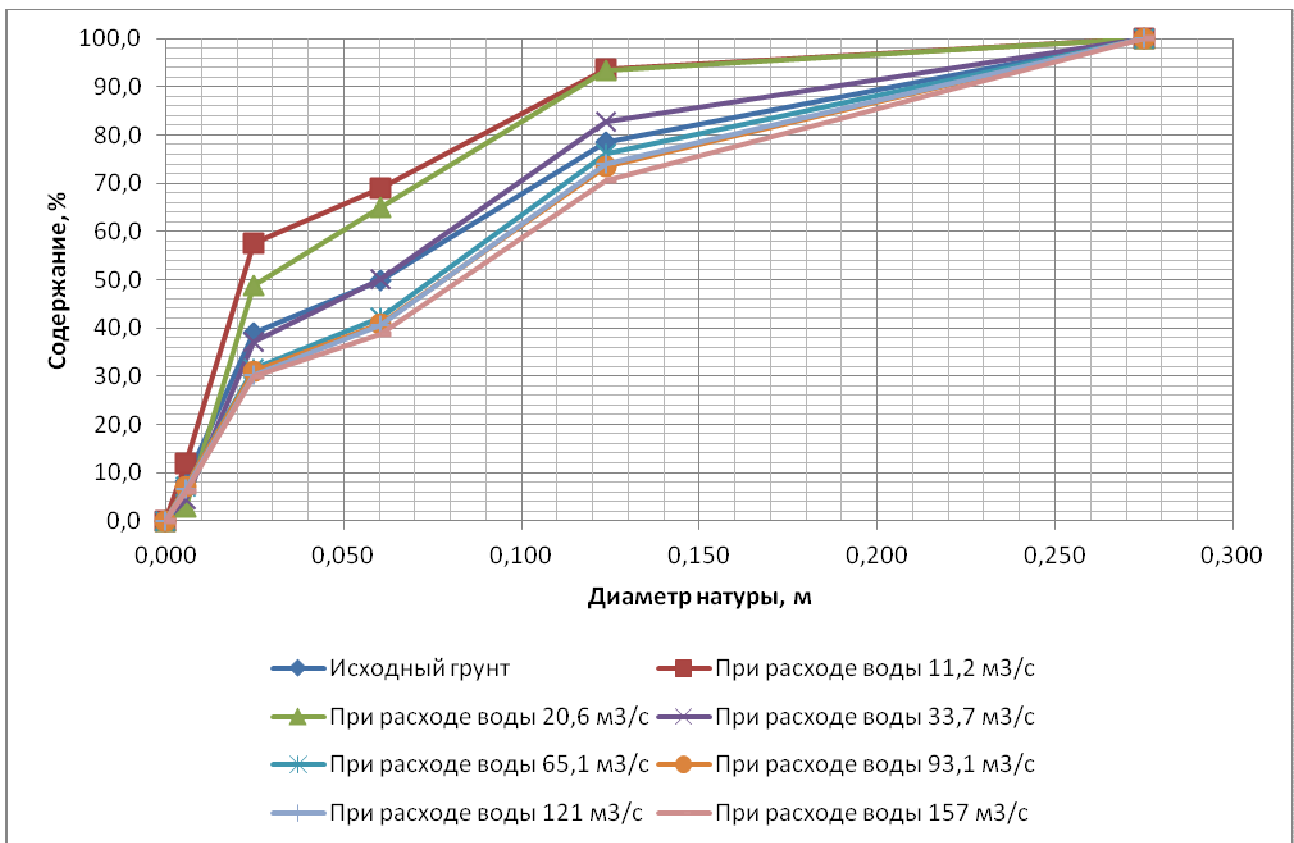


Рис. 1. Интегральные кривые гранулометрического состава наносов на каждой стадии поавадка первого эксперимента по сравнению с исходной кривой донных отложений

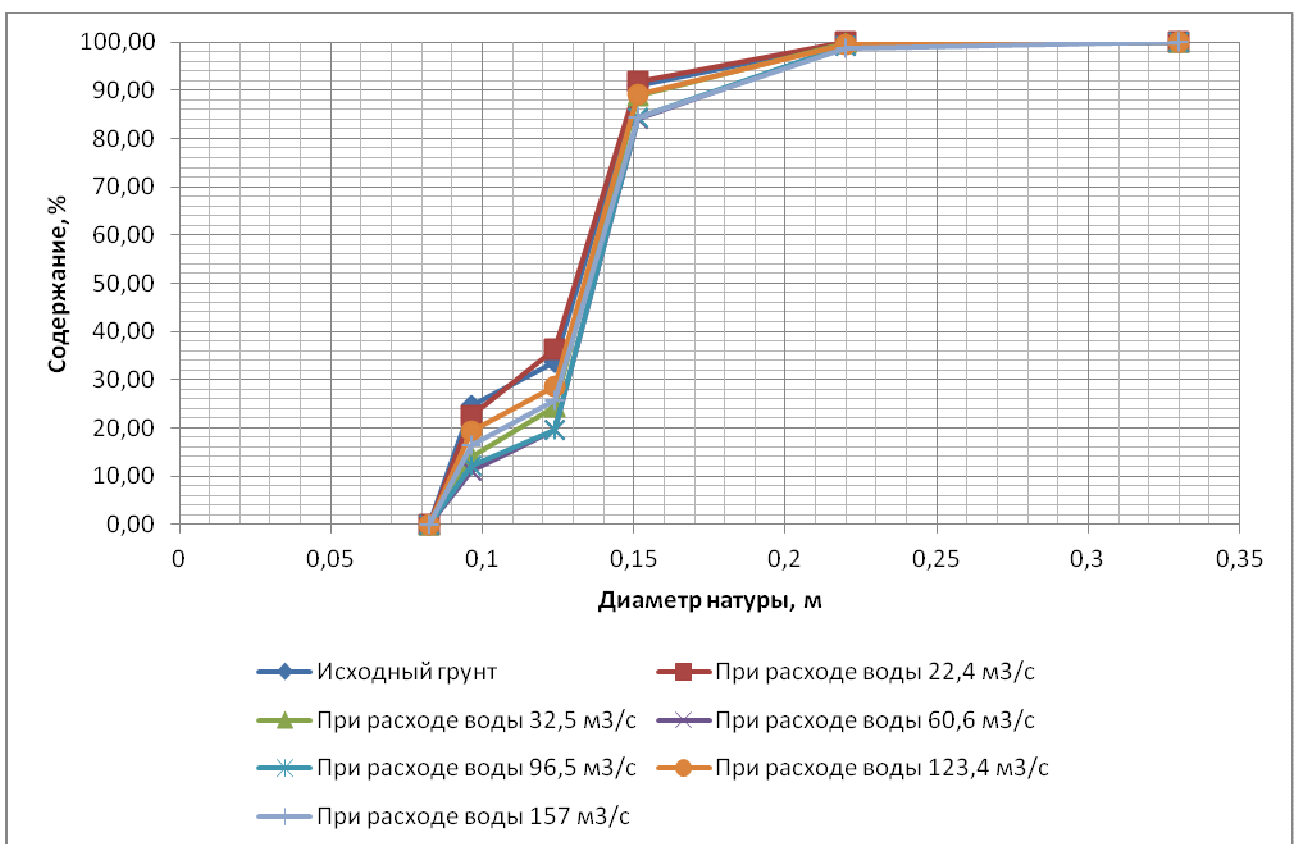


Рис. 2. Интегральные кривые гранулометрического состава наносов на каждой стадии поавадка второго эксперимента по сравнению с исходной кривой донных отложений



В дальнейшем все формулы, имеющие в своем составе характеристику грансостава, для первых двух экспериментов проверялись с использованием грансостава донных отложений и грансостава донных наносов на соответствующей стадии паводка.

### Выводы и рекомендации

Для оценки точности формул был выбран критерий  $\Delta = \frac{q_{\text{расч}}}{q_{\text{изм}}} * 100\%$ , а допустимым интервалом ошибки – диапазон  $50 \leq \Delta \leq 200\%$ , т.е. занижение и завышение результата в два раза.

Анализ результатов расчетов по формулам позволил обосновать следующие рекомендации по расчетам расхода донных наносов в реках.

1. Для больших равнинных рек рекомендовано 9 формул, учитывающих грядовое движение, и 9 формул, не учитывающих его:

- З.Д. Копалиани  $\Delta = 104\%$  [17] – из числа формул первой группы, учитывающих грядовое движение

$$h_r = 0,39d \left(\frac{v}{V_0}\right)^{2,5} Fr^{-3,75} \text{ м}, C_r = 0,009V \left(\frac{v}{V_0}\right)^2 \left(\frac{h_r}{d}\right)^{-0,8} \text{ м/с} \quad (1)$$

$V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3}$  – по В.Н. Гончарову.

- Л.Д. Когана и В.П. Углова (1985)  $\Delta = 150\%$  [6] – из числа формул второй группы, не учитывающих грядовое движение

$$q_r = c w d \rho_r \left(\frac{1,35}{k}\right)^2 \left(\frac{v}{kw}\right)^n \text{ кг/с/м} \quad (2)$$

$$k = 2,93$$

$$S = \frac{v}{kw}$$

при  $S < 2,5$   $n = 12, c = 17 * 10^{-8}$ ,

при  $2,5 < S < 8,0$   $n = 3, c = 64 * 10^{-4}$ ,

при  $S > 8$   $n = 4, c = 78 * 10^{-5}$

$w$  – по В.В. Романовскому.

2. Для малых и средних равнинных рек рекомендовано 11 формул, учитывающих грядовое движение, и 9 формул, не учитывающих его:

- Б.Ф. Смищенко и З.Д. Копалиани  $\Delta = 117\%$  [17]

$$h_r = 0,25H \text{ м при } H \leq 1 \text{ м}, h_r = 0,2 + 0,1H \text{ м при } H > 1 \text{ м}, C_r = 0,019V Fr^{2,9} \text{ м/с} \quad (3)$$

- А.Н. Бутакова (1998)  $\Delta = 136\%$  [1]

$$q_r = 0,07 \left(\frac{v}{\sqrt{g}}\right)^{\frac{4}{3}} \sqrt{d} V_0 \left(\frac{v}{V_0}\right)^3 \text{ м}^3/\text{с/м} \quad (4)$$

$$V_0 = 1,25 \sqrt{gd} \lg \frac{8,8H}{d}$$

3. Для грядового движения на горно-предгорных реках рекомендовано 12 формул, учитывающих грядовое движение, и 6 формул, не учитывающих его:

- А.А. Костюченко и З.Д. Копалиани  $\Delta = 101\%$  [17]

$$h_r = 0,13H \text{ м, } C_r = 0,009V \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \left(\frac{h_r}{d}\right)^{-0,8} \text{ м/с} \quad (5)$$

$V_0 = 3H^{0,2}(d + 0,0014)^{0,3}$  – по В.Н. Гончарову.

- В.Н. Лазарев, Ф.М. Чернышов (1974)  $\Delta = 125\%$  [9]

$$q_r = 0,1 \left(\frac{d}{H}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{d}{w} \sqrt{\frac{V-V_0}{w}} (V - V_0)^2 \frac{q}{H\sqrt{gH}} \text{ м}^3/\text{с/м} \quad (6)$$

$$V_0 = 3,83d^{\frac{1}{3}}H^{\frac{1}{3}}$$

4. Для бесструктурного транспорта на горно-предгорных реках рекомендовано всего 3 формулы:

- Л.Г. Гвелесиани (1946)  $\Delta = 50 - 200\%$  [18]

$$q_r = 12,95 \frac{dV_0}{\left(\lg \frac{12d_{max}+d}{d}\right)^2} \left(\frac{V^2}{V_0^2} - 1\right) \left(\frac{V}{V_0} - 1\right) \text{ кг/с/м} \quad (7)$$

$$V_0 = 3,4 \frac{\lg\left(\frac{8,8H}{d}\right)}{\lg\left(\frac{12d_{max}+d}{d}\right)} \sqrt{d} \text{ м/с}$$

- И.И. Леви (1957)  $\Delta = 50 - 200\%$  [18]

$$q_r = 0,00076 \left(\frac{V}{\sqrt{gd_{50}}}\right)^3 d_{50} (V - V_0) \left(\frac{d_{20}}{H}\right)^{0,25} \text{ м}^3/\text{с/м} \quad (8)$$

для квадратичной области ( $Re_d > 25$ ,  $d_{50} > 1 \dots 1,5$  мм):

$$V_0 = \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,1} \frac{C}{\sqrt{g}} V_{*0} \text{ м/с}$$

$$V_{*0} = 0,16 \sqrt{\left(\frac{\rho_r}{\rho} - 1\right) gd_{50}} \text{ м/с}$$

- формула Г.И. Шамова (1952)  $\Delta = 50 - 200\%$  [18]

$$q_r = \alpha \sqrt{d_{max}^2} \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 (V - V_0) \left(\frac{d}{H}\right)^{0,25} \text{ кг/с/м} \quad (9)$$

$$V_0 = 3,83 \left(\frac{d_{50}}{d_{90}}\right)^{0,2} d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{3}} \text{ м/с.}$$

Зависимости (1)-(9) позволяют рассчитывать расход донных наносов в реках дифференцированно: для больших, средних и малых равнинных и горно-предгорных участков рек при структурной (грядовой) и бесструктурной (безгрядовой) формах движения донных наносов.

## Список литературы

1. Бутаков А.Н. Обоснование расчетной формулы для расхода русловых наносов методом сравнительного анализа // Тр. Академии водохозяйственных наук. – 1998. – Вып. 5 – Гидрология и русловые процессы. – С. 225–238.
2. Гончаров В.Н. Движение наносов. – ОНТИ, 1938. – 308 с.
3. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 428 с.
4. Гришанин К.В. Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990, 320 с.
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб: Нестор-История, 2011. – 504 с.
6. Коган Л.Д., Углов В.П. Формы транспорта и расход наносов. Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. – М.: Наука, 1985. – С. 131–137.
7. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках // Сборник работ по гидрологии. – 2004. – № 27. – С. 25–40.
8. Пушкарёв В.Ф. Движение влекомых наносов // Тр. ГГИ. – 1948. – вып. 8(62). – С. 93-109.
9. Самохвалова О.А. К вопросу расчета расхода крупных донных наносов при их грядовой форме перемещения в речных руслах // Тр. VIII Международной научно-практической конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – М.: РУДН, 2014. – Т. 2. – С. 113–123.
10. Самохвалова О.А. Расчет высоты песчаных гряд в больших и малых равнинных реках // Вестник СПбГУ. – 2011. – Сер. 7. – Вып. 4. – С. 135–148.
11. Самохвалова О.А. Расчеты скорости перемещения песчаных гряд в равнинных реках // Водные пути и русловые процессы. – 2013. – Вып. 1. – С. 182–200.
12. Тимирова Р.В., Классен З.А. К вопросу определения расхода влекомых наносов па горно-предгорных участках рек // Труды САНИИРИ. – 1970. – Вып. 124. – С. 197–205.
13. Учет руслового процесса на участках подводных переходов трубопроводов через реки. СТО ГУ ГГИ 08.29-2009. – 2009. – 175 с.
14. Шамов Г.И. Формулы для определения предельной скорости и расходов донных наносов // Тр. ГМИ. – 1952. – Вып. 36 (90). – С. 3–17.
15. Brownlie W.R. Compilation of alluvial channel data: laboratory and field // W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Division of Engineering and Applied Science California Institute of Technology. – Report № KH-R-43B. – Pasadena, California, 1981. – 209 p.
16. Chang H.H. Fluvial processes in river engineering. – Malabar, Florida: Krieger publishing company, 1992. – 432 p.

17. Samokhvalova O.A. Bed load assessment in plain rivers // Proc. of the conf. 'Contemporary hydrological issues in the research of Polish and Russian MSc and PhD students'. – Torun, Poland, 2012. – P. 91–103.
18. Samokhvalova O.A. Selective methodology of bedload discharge calculations in rivers // Proc. of the conf. 'Deltas: genesis, dynamics, modeling and sustainable development'. – Istomino, Republic of Buryatia, Russian Federation, 2014. – P. 39-44.
19. Shinohara K., Tsubaki T. On the characteristics of sand waves formed upon the beds of open channels and rivers // Reports of Research institute for applied mechanics. – 1959. – vol. 7. – № 25. – P. 15–45.
20. Williams G.P. Flume width and water depth effects in sediment transport experiments // Geological survey professional paper, 562-H. – Washington: US Government printing office, 1970. – 30 p.

**Рецензенты:**

Боровков В.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры гидравлики и водных ресурсов ФБГОУ ВПО «Московский государственный строительный университет Минобрнауки РФ», г. Москва;

Дебольский В.К., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук», г. Москва.