

Н.Б. Барышников, Ю.А. Демидова, А.О. Пагин, А.Б. Соколов

ФОРМУЛЫ И МЕТОДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСХОДОВ ДОННЫХ НАНОСОВ

N.B. Baryshnikov, J.A. Demidova, A.O. Pagine, A.B. Sokolov

FORMULAS AND METHODS FOR CALCULATION OF BED LOAD DISCHARGE

Рассматриваются основные методы расчетов расхода донных наносов, приводятся их достоинства и недостатки. Приведен анализ формул для расчета расхода донных наносов по данным, полученным при проведении экспериментов. В результате работы сделаны выводы о том, что все формулы дают погрешности, превышающие допустимые пределы. Одним из факторов, влияющих на неточность формул, является недоучет эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, в результате чего необходимо вводить поправочный коэффициент в расчетные формулы.

Ключевые слова: русло, расход, анализ формул, эксперименты, эффект взаимодействия, потоки, пойма, расход наносов.

The basic techniques for bed load discharge calculations are considered with due attention to their advantages and disadvantages. An analysis of the formulas for such calculations is given based on the data obtained during experiments. A conclusion is made that all the formulas lead to errors exceeding permissible limits. One of the factors producing the inaccuracy of the formulas is insufficient account for interaction effect between the channel stream and the floodplain stream, resulting in the necessity for a correction index in the calculation formulas.

Key words: bed load, discharge, analysis of formula, experiments, effect of interaction, streams, bed load discharge.

Существующие методы измерения расходов донных наносов, к сожалению, несовершенны. Кроме того, из-за низкой точности получаемой информации на сети Росгидромета измерения расходов донных наносов были прекращены. Поэтому большинство разрабатываемых формул для расчетов расходов этих наносов основано на лабораторных данных и имеет ограниченный диапазон применения.

Разработка методики расчета расходов донных наносов осуществлялась на основе трех подходов: 1) динамического, изучающего силы, действующие на частицу, находящуюся на дне потока. Основы этого подхода были заложены французским исследователем Дюбуа и развиты как отечественными (В.Н. Гончаров, Г.И. Шамов и др.), так и зарубежными (А. Шоклич и др.) авторами; 2) статистического, изучающего вероятность срыва и перемещения донной частицы (Г.А. Эйнштейн, М.А. Великанов и др.); 3) методом анализа размерностей (И.В. Егизаров). Этот подход фактически является вспомогательным и обычно используется только для анализа и систематизации экспериментальных данных.

В настоящее время имеется около 200 формул для расчета расходов донных наносов [Жопалиани, 2004; Любимов, 1960]. Поэтому для упрощения ана-

лиза Н.Б. Барышников [Барышников, 2007] разделил все эти формулы и методы на четыре группы. В основу деления он положил определяющий параметр. Данная классификация не является строгой, ибо формулы гидравлики позволяют перейти от одного определяющего параметра к другому.

Следует отметить, что З.Д. Копалиани [Копалиани, 2004], выполнив анализ методов расчета расходов донных наносов, предложил разделить все известные формулы и методы не на четыре, а на девять групп.

- Формулы, использующие в качестве определяющего аргумента расход воды:

формула Никит
$$g_s = 530I^{2.2}(Q - Q_c)^2. \quad (1)$$

Здесь g_s – расход донных наносов на единицу ширины потока; Q и Q_c – расход воды в реке и расход воды, соответствующий началу движения наносов; I – уклон водной поверхности. Формулы этой группы широко распространены за рубежом, в частности, формулы Мейер-Петера, Джилберта, Чанга и других авторов.

- Формулы, использующие в качестве определяющего аргумента скорость потока.

К данной группе можно отнести формулы:

Гончарова:
$$G = \frac{1 + \phi}{880} v_n k \left(\frac{v^3}{v_k^3} - 1 \right) \left(\frac{v}{v_k} - 1 \right) B; \quad (2)$$

Доната:
$$g_s = \frac{K}{C^4} \gamma^2 v^2 (v^2 - v_c^2). \quad (3)$$

Здесь G – расход донных наносов; v и v_c – средняя и средняя критическая скорости; γ – удельный вес воды; K определяется по графику, предложенному Straub (1935); C – коэффициент Шези; B – ширина русла; k – крупность частиц.

- Формулы, использующие в качестве определяющего аргумента уклон водной поверхности:

формула Мейер-Петера:
$$\frac{0,4g_s^{2/3}}{d} = \frac{q^{2/3}I}{d} - 17; \quad (4)$$

формула Вафина:
$$g_s = 0,6I^{0,6}(vh)^{1,2}, \quad (5)$$

где h – глубина потока.

- Формулы, основанные на использовании касательных напряжений в качестве определяющего аргумента, к данной группе формул относятся следующие:

формула Дюбуа:
$$g_s = K\tau(\tau - \tau_c); \quad (6)$$

формула Шильдса:
$$\frac{g_s \gamma_s}{q \gamma F} = 10 \frac{\tau - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d}, \quad (7)$$

где q – расход воды на единицу ширины потока; d – диаметр частиц потока; τ_c – критическое касательное напряжение, определяемое по диаграмме Шильдса; τ – влекущая сила; γ_s – удельный вес наносов; K – коэффициент, характеризующий наносы; F – площадь живого сечения.

- Формулы, учитывающие движение крупных донных наносов в структурной, т.е. донно-грядовой форме:

формула Снищенко–Копалиани:
$$g_s = 0,011 h_r \nu Fr^3. \quad (8)$$

Здесь h_r – высота гряд; Fr – число Фруда.

- Формулы, основанные на вероятностном описании движения донных наносов.

- Формулы, использующие в качестве определяющего аргумента мощность потока:

формула Бэгнольда:
$$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g_s \tan \alpha = \tau \nu e_s. \quad (9)$$

Здесь $\tan \alpha$ – отношение тангенциальной к нормальной влекущей силе; e_s – коэффициент эффективности.

- Формулы, выведенные на основе регрессионных зависимостей:

формула Рухадзе:
$$g_s = K 0,000036 \nu^{3,6} I^{0,13} \alpha^{-0,45} d^{0,3}. \quad (10)$$

Здесь g_s – расход донных наносов на единицу ширины потока; K – коэффициент, учитывающий увеличение транспорта наносов при срыве самоотмостки; $\alpha = \frac{d}{h}$.

- Формулы, основанные на региональных зависимостях, полученных для однотипных рек или групп рек одного региона или для конкретных рек, и использующие один аргумент – расход воды или скорость потока.

Однако большинство методов и формул для расчетов расходов донных наносов (перемещаемых в безгрядной фазе), применяемых в России, практически ограничиваются четырьмя первыми группами.

Применимость этих формул для расчёта расходов донных наносов обосновывается следующими соображениями. Транспорт наносов и русловые деформации по существу являются двумя сторонами одного процесса. В основе русловых деформаций лежит взаимодействие потока и русла, выражающееся как в виде их динамического взаимодействия, так и в виде обмена потока и русла наносами, т.е. постоянно наблюдающегося осаднения и смыва наносов

с поверхности русла. Таким образом, русловые деформации представляются проявлением эрозионно-аккумулятивных процессов в русле и на пойме реки. При нарушении баланса взаимообмена наносами процесс деформации приобретает однонаправленный характер, т.е. наблюдается либо заиление, либо размыв русла. Такого рода деформации существенным образом изменяют гидравлические элементы потока, что приводит в действие обратные связи. В результате постепенно уменьшается интенсивность одностороннего процесса деформации и, в конечном итоге, он затухает.

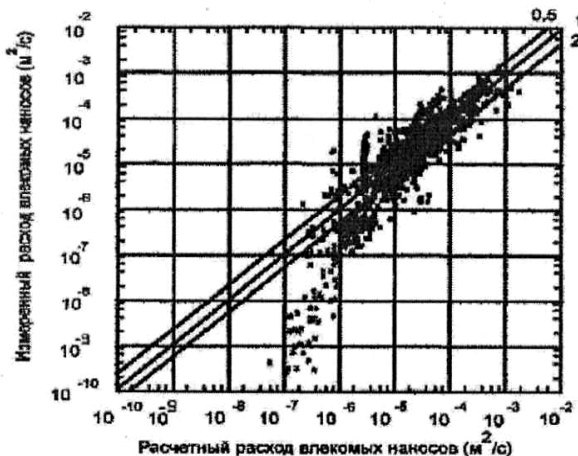
Анализ приведенных выше формул для расчета расходов наносов, полученных различными способами, показывает, что большинство из них может быть приведено к расчетному виду $g_s = f(v/v_k)$, что свидетельствует о достоверности предпосылок, положенных в основу их вывода.

Авторы, как правило, не указывают, для какого вида перемещения наносов следует применять полученные ими формулы. В то же время донно-грядовая фаза перемещения наносов существенно отличается от их перемещения качением, влечением или сальтацией. Поэтому для расчетов расходов наносов, перемещающихся в донно-грядовой фазе, обычно применяются методики расчетов, существенно отличающиеся от приведенных выше. Например, простейшая формула вида:

$$g_{\Gamma} = \alpha \Delta_{\Gamma} c_{\Gamma}, \tag{12}$$

где c_{Γ} – скорость перемещения гряды; $\alpha \approx 0,6 - 0,7$ – параметр формы гряды.

З.Д. Копалиани и А.А. Костюченко [Копалиани, 2004], произведя анализ методов расчетов расходов донных наносов, пришли к выводу, что практически все методики и формулы либо недостаточно надежны, либо применимы в ограниченном диапазоне изменения гидравлических характеристик потока и морфометрических параметров русла.



Результаты сравнения измеренных расходов влекомых наносов и их расчетных значений по формуле ГГИ

Как видно на рисунке, четкая зависимость наблюдается только до значений расходов донных наносов (на единицу ширины потока), примерно равных $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

При использовании этой информации необходимо учитывать фактор релаксации, т.е. запаздывания процесса переформирования гряд от изменения гидравлических характеристик потока, что существенно затрудняет её использование.

Как известно, наибольшее количество наносов поступает в реки в периоды подъёма уровней при пропуске паводков и половодий, когда наблюдается наибольшее соответствие их поступления наносов транспортирующей способности русловых потоков. В то же время большинство формул получено по данным измерений в лабораториях. Безусловно, натурные потоки существенно отличаются от лабораторных, в частности, тем, что в природе, как правило, процесс нестационарный. К тому же необходимо учитывать релаксацию расходов наносов по отношению к гидравлическим характеристикам потоков и другие факторы. Однако лабораторные исследования, несмотря на эти и другие недостатки, позволяют выявить основные закономерности свойственные как лабораторным, так и натурным речным потокам.

Учитывая, что в России большинство рек равнинные и высокие паводки и половодья на них проходят при затопленной пойме, на кафедре гидрометрии РГГМУ были проведены эксперименты по выявлению влияния эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов [Пагин А.О., 2007]. При проведении экспериментов был применен, так называемый, метод сравнения, заключающийся в том, что измерения расходов донных наносов и других параметров потока и русла сначала производились в изолированном русловом потоке, а затем фактически повторялись при взаимодействии руслового и пойменного потоков при различных углах их динамических осей потоков (5^0 , 10^0 , 15^0 , 20^0). Для оценки эффективности было выбрано 20 наиболее распространенных бесструктурных формул для расчета расходов донных наносов, в том числе, получившим положительные оценки в результате анализа, произведенного в ГГИ. Для расчетов были использованы формулы следующих авторов: Гвелисиани, Гончарова, Вафина, Мейер-Петера, Доната, Рухадзе, Великанова, Шамова, Леви и других. Расчеты проводились для каждого из измеренных расходов донных наносов. В качестве примера в таблице приведены результаты расчетов по всем исследованным 19 формулам. Анализ результатов показал, что по всем формулам получены неудовлетворительные результаты. Действительно, погрешности расчетов значительно превышают допустимые пределы, достигая в ряде случаев несколько тысяч процентов.

Проведенный анализ свидетельствует о необходимости введения в расчетные формулы дополнительного коэффициента, учитывающего эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, в частности, частично учитываемого с помощью угла α .

Экспериментальные данные о расходах наносов и результаты расчетов по формулам

1	Изолированное русло / $\frac{G_{p(изм)} - G_{p(расч)}}{G_{p(изм)}} 100\%$, $\Delta\%$		Параллельные оси потоков / $\frac{G_{p(изм)} - G_{p(расч)}}{G_{p(изм)}} 100\%$, $\Delta\%$		Расхождение осей потоков ($\alpha = 10^0$)/ $\frac{G_{p(изм)} - G_{p(расч)}}{G_{p(изм)}} 100\%$, $\Delta\%$		Расхождение осей потоков ($\alpha = 20^0$)/ $\frac{G_{p(изм)} - G_{p(расч)}}{G_{p(изм)}} 100\%$, $\Delta\%$	
	2	3	4	5	6	7	8	9
Измеренные расходы	0,00124		0,000148		0,0154		0,0338	
Формула ГГИ	0,00019	<u>85%</u>	0,0000012	<u>99%</u>	0,589	<u>3720%</u>	2,34	<u>6830%</u>
Формула Гончарова	0,00023	<u>81%</u>	0,0000263	<u>82%</u>	0,0659	<u>328%</u>	0,212	<u>530%</u>
Формула Гвелесиани	0,00392	<u>216%</u>	0,0011	<u>618%</u>	0,138	<u>796%</u>	2,61	<u>7650%</u>
Формула Вафина	0,00151	<u>21%</u>	0,000536	<u>261%</u>	0,000943	<u>94%</u>	0,000319	<u>99%</u>
Формула Мейер-Петера	0,00325	<u>162%</u>	0,000897	<u>506%</u>	0,0358	<u>132%</u>	0,102	<u>202%</u>
Формула Доната	0,0354	<u>275%</u>	0,0125	<u>836%</u>	1,89	<u>1210%</u>	7,89	<u>2320%</u>
Формула Рухадзе	0,00654	<u>427%</u>	0,0000589	<u>60%</u>	0,0877	<u>469%</u>	2,32	<u>6760%</u>
Формула Великанова	0,00897	<u>623%</u>	0,000165	<u>11%</u>	0,0979	<u>536%</u>	1,467	<u>4240%</u>
Формула Шамова	0,00038	<u>69%</u>	0,000041	<u>72%</u>	0,0741	<u>381%</u>	0,581	<u>1620%</u>
Формула Леви	0,000191	<u>85%</u>	0,000021	<u>86%</u>	0,0613	<u>298%</u>	0,154	<u>356%</u>
Формула Егизарова	0,00043	<u>65%</u>	0,000053	<u>64%</u>	0,0758	<u>392%</u>	0,597	<u>1670%</u>
Формула Кудряшова	0,000298	<u>76%</u>	0,000038	<u>74%</u>	0,0568	<u>269%</u>	0,946	<u>2700%</u>
Формула Когана	0,0138	<u>1010%</u>	0,002570	<u>1640%</u>	0,939	<u>6000%</u>	1,89	<u>5490%</u>
Формула Полякова	1,058	<u>85200%</u>	0,00257	<u>1640%</u>	1,99	<u>12800%</u>	4,56	<u>13400%</u>
Формула Шоклич	0,00587	<u>100%</u>	0,000090	<u>39%</u>	0,0187	<u>22%</u>	0,124	<u>267%</u>
Формула Вонга	2,41	<u>373%</u>	1,65	<u>14770%</u>	3,87	<u>25000%</u>	6,58	<u>19400%</u>
Формула Орлова	0,156	<u>1960%</u>	0,0054	<u>3550%</u>	1,06	<u>6780%</u>	2,11	<u>6140%</u>
Формула Знаменской	0,000589	<u>12500%</u>	0,000046	<u>69%</u>	0,00489	<u>68%</u>	0,0579	<u>71%</u>
Формула Романовского	0,00000546	<u>53%</u>	0,000000798	<u>100%</u>	0,0000852	<u>99%</u>	0,000847	<u>97%</u>

1	2		3		4		5	
Ср. значения, рассчитанные по формулам	0,195	5348%	0,93	1214%	0,582	3052%	1,82	4200%
Максимальные значения, рассчитанные по формулам	1,058	<u>85200%</u>	1,65	<u>14770%</u>	3,87	<u>25000%</u>	6,58	<u>19400%</u>
Минимальные значения, рассчитанные по формулам	0,00151	21%	0,000046	<u>69%</u>	0,0187	<u>22%</u>	0,0579	<u>71%</u>

Дополнительный анализ экспериментальных данных показал (таблица), что по большинству расчетных формул наблюдается значительное увеличение погрешностей расчетов при увеличении глубин пойм. По-видимому, существенное значение имеет и высота выступов шероховатости пойм. Экспериментальными исследованиями влияние этого фактора на транспорт наносов русловым потоком на данной модели не производились.

В то же время экспериментальные исследования 60-х годов прошлого столетия, выполненные в малом гидравлическом лотке с переменным уклоном [Барышников, 2007] при переменной шероховатости поймы, позволили обнаружить влияние этого фактора на транспортирующую способность руслового потока.

По-видимому, вывод дополнительных коэффициентов к уже имеющимся формулам для расчетов расходов донных наносов в русловых потоках при их взаимодействии с пойменными на данном этапе представляется нецелесообразным из-за малого объема экспериментальных данных. Действительно, эксперименты выполнены в лаборатории только при расходящихся динамических (геометрических) осях руслового и пойменного потоков и только при 4-х значениях угла расхождения осей потоков и гладкой пойме.

Однако, как указывалось выше, можно рекомендовать введение в действующие формулы дополнительного параметра, учитывающего как влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков, в частности, с помощью угла α , так и глубину затопления и шероховатость поймы. Величину этого параметра необходимо установить на основе дополнительной, большей по объёму, натурной и лабораторной информации. Следует отметить, что для данного типа взаимодействия потоков величина этого коэффициента должна быть больше единицы.

В результате проведенного анализа можно сделать выводы и предложения:

- все исследованные формулы и методы расчета расходов донных наносов не учитывают эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков, что приводит к большим погрешностям расчетов. Величина этих погрешностей превышает допустимые пределы и по некоторым оценкам достигает несколько сотен процентов;
- для совершенствования формул и методов расчетов необходимо вводить в них поправочные коэффициенты, учитывающие эффект взаимодействия потоков, в частности с помощью учета угла α , а также глубин и шероховатости пойм.

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.
2. *Копалиани З.Д., Костюченко А.А.* Расчёты расхода донных наносов в реках / Сб. работ по гидрологии. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004, № 27, с. 25–40.
3. *Любимов В.Е.* О способах учёта стока донных наносов на реках // Труды III Всесоюз. гидролог. съезда. Т. 5. – Л.: Гидрометеиздат, 1960, с. 366–376.
4. *Пагин А.О.* Влияние эффекта взаимодействия руслового и пойменного потоков на транспорт донных наносов в русле реки // Материалы межвузовской конференции. Факультет географии РГПУ им. А.И. Герцена. География и смежные науки. LX Герценовские чтения. – СПб.: изд-во ТЕССА, 2007, с. 167–169.