

РАСЧЕТЫ РЕЧНЫХ НАНОСОВ

М.В. Шмакова¹

¹Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

RIVER SEDIMENT CALCULATIONS

M.V. Shmakova¹

¹Institute of Limnology RAS, St. Petersburg, Russia

Перенос речным потоком твердого вещества (наносов) является определяющим в русловых процессах. При имеющемся многообразии формул расхода наносов качество расчетов по этим формулам очевидно недостаточное. В настоящей работе проводится сравнительный анализ результатов расчетов по некоторым формулам общего расхода наносов и расхода взвешенных и влекомых наносов.

The transfer of sediment by the river flow is crucial in channel processes. With the variety of sediment flow formulas available, the quality of calculations using these formulas is obviously insufficient. In this paper, a comparative analysis of the results of calculations for some formulas of the total sediment and the suspended and bed sediment.

Изменения отметок дна водоемов и водотоков – процесс естественный, обусловленный взаимодействием движущихся водных масс и наносов, поступающих из вышерасположенных створов в результате размыва русла и с поверхности водосбора в результате почвенной эрозии.

Это взаимодействие является следствием неравновесности системы «водный поток – донные отложения – наносы», когда имеет место несоответствие переносимых потоком наносов и транспортирующей способности потока. Признаками неравновесной системы является изменение вклада кинетической энергии потока воды и движущихся наносов, а также потенциальной энергии донного и берегового грунта в общий энергетический баланс системы. В случае равенства между поступлением наносов и транспортирующей способностью потока русловая система находится в равновесии. В этом случае «русловые деформации сводятся к перемещению мелких аккумулятивных образований – донных гряд. В этом случае местные размывы уравниваются заилением» [1].

В неравновесной системе речной поток стремится минимизировать энергию движения, что приводит к переформированию как гидравлической структуры речного потока, соотношения жидкой и твердой фазы в нем, так и формы речного русла. Интенсивность этих переформирований зависит от степени несоответствия между расходом наносов и транспортирующей способностью потока. Однако характер переформирований связан с типом пород, которыми представлены дно и берега водотока.

Несомненно, что расчеты русловых деформаций неразрывно связаны с количественной оценкой расхода твердого вещества, переносимого речным потоком. На заре исследований процессов перемещения твердого материала в водотоках было принято разделение общего расхода наносов на влекомую и взвешенную составляющие. Однако, очевидно, как из анализа физики процесса неустановившегося неравномерного двухфазного массопереноса, так и из данных почти вековых наблюдений за речными потоками, что в зависимости от характера движения, фазы его неустановившегося режима деление наносов по признаку взвешенные и влекомые крайне условный. В современной литературе многократно рассматривались вопросы условий перехода из одного состояния в другое. «Перемещение наносов не является процессом непрерывным, частицы временами выпадают на дно потока, а затем взвешиваются вновь и переносятся далее. Процесс постоянно наблюдающегося взвешивания и осаждения наносов определяет процесс деформации русла» [1]. «По участию в формировании речного русла наносы, перемещаемые потоком, условно делятся на руслоформирующие (русловые) и транзитные (нерусловые). ...Взвешенные наносы перемещаются во взвешенном состоянии в слое, толщина которого соизмерима с глубиной потока или равна ей, и могут быть как руслоформирующими, так и транзитными» [5]. «Влекомые наносы всегда входят в состав руслообразующих; доля взвешенных наносов в нем очень изменчива...» [6].

При этом, в математическом моделировании двухфазного потока вычисление отдельно расходов взвешенных и влекомых наносов полностью противоречит физике процесса. С одной

стороны, все переменные состояния потока связаны между собой, и рассчитывать гидравлические характеристики потока (глубину и скорость) без учета взвесенесущей нагрузки некорректно. С другой стороны, отдельный невзаимосвязанный расчет расхода влекомых и взвешенных наносов также не соответствует единому физическому закону движения твердого вещества в водном потоке. Очевидно, что представление одного и того же физического закона в математической модели разными эмпирическими формулами для взвешенной и для влекомой формы перемещения наносов ошибочны.

При достаточно большом количестве формул расходов влекомых наносов, формулы общего расхода наносов и расхода взвешенных наносов не так распространены. Однако, при часто эмпирической природе формул расходов взвешенных и влекомых наносов, формулы общего расхода наносов нередко более физически обоснованы.

В настоящей работе проводится сравнительный анализ результатов расчетов по некоторым формулам общего расхода наносов и расхода взвешенных и влекомых наносов с использованием данных наблюдений за расходами взвешенных и влекомых наносов на водотоках с различными гидравлическими характеристиками.

Общий расход наносов.

Общий расход наносов является функцией гидравлических характеристик потока – средней скорости потока, глубины, расхода воды, уклона, размера, гидравлической крупности и плотности частиц, а также касательного напряжения на твердой границе потока.

В качестве расчетного материала использовались данные наблюдений на 15 гидрометрических створах, расположенных на американских реках штатов Аляска, Айдахо, Колорадо, Вашингтон и Висконсин [8].

Среднее относительное отклонение по всем исследуемым водотокам составило 55% (аналитическая формула расхода наносов [7]), 64% (формула Карима-Кеннеди), 64% (формула Бэгнольда) и 72% (формула Энгелунда-Хансена). Формулы общего расхода наносов Янга, Молинаса и Ву, Карасева и Гончарова показали плохие результаты (превышение над наблюдаемыми расходами наносов составило более 1000%, также имели место отрицательные значения)

Расход влекомых наносов.

Как известно, оценка расхода влекомых наносов естественных водотоков является одной из наиболее сложных гидравлических задач. К сожалению, приходится констатировать, что в последнее время активность в развитии новых подходов к решению данной проблемы является недостаточной. При этом, основное затруднение заключается в отсутствии надежной верификации предлагаемых расчетных формул по данным натурных наблюдений.

Формулы расхода влекомых наносов могут быть ориентированы как на непосредственно движение отдельных частиц влекомых наносов, так и на грядовую форму движения наносов. Формулы, описывающие грядовую форму движения наносов, учитывают геометрические характеристики гряд – длину, высоту и так далее, и могут использоваться для рек с песчаным дном. Такие формулы обеспечены относительно достоверными данными наблюдений за расходами наносов, что позволяет оптимизировать как структуру формулы, так и ее параметры.

Наибольшую сложность в измерении расхода наносов представляют влекомые наносы в реках с галечно-гравийным дном. Это, соответственно, затрудняет апробацию формул расхода влекомых наносов и оптимизацию структуры и параметров этих формул.

В связи с этим особенную ценность представляют данные наблюдений за влекомыми наносами на водотоках, произведенные в рамках уникальных авторских исследований твердого стока. К такому исследованию относятся наблюдения за режимом горной реки Ала-арча и измерение ее гидравлических характеристик, проведенные в середине 80-х годов прошлого столетия [4]. Данные, полученные в результате этого исследования можно использовать для верификации соответствующих формул для вычисления расходов влекомых наносов.

Вычисления расхода влекомых наносов проводились для данных экспериментов на гидравлическом лотке [2] и для горной реки Ала-арча, расположенной в Киргизском Алатау (Тянь-Шань) [4].

В таблице 1 приведены результаты расчета по некоторым формулам расхода влекомых наносов и по аналитической формуле расхода наносов [7]. Для горных потоков в условиях, когда

основную часть стока наносов представляют влекомые, эта формула может быть использована для расчета расхода влекомых наносов.

В расчетах были задействованы формулы расхода влекомых наносов А. Шоклича, Г.И.Шамова, И.В. Егизарова, К.В.Гришанина, В.Н.Гончарова, И.И. Леви, формула, рекомендованная ВСН-83 (для рек с $I > 0.01$) и аналитическая формула расхода наносов. Приемлемые средние относительные отклонения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами влекомых наносов показали: формула А.Шоклича (по данным экспериментам на лотках) – 49%; формула, рекомендованная ВСН-83; аналитическая формула расхода наносов – 32% (по данным экспериментам на лотках) и 42% (р. Ала-арча).

Расчеты по прочим формулам показали большие отклонения и в ряде случаев имели место отрицательные значения.

Расход взвешенных наносов.

Разработка формул расхода взвешенных наносов, к сожалению, почти не нашла своего места в практике гидравлических расчетов. При этом большое внимание в исследовании взвешенных наносов отечественными учеными уделялось распределению мутности по вертикали и по длине реки. Также проводились большие исследования уже другого масштаба осреднения по анализу обобщенных материалов пространственно-временного распределения мутности (А.В. Караушев, Г.И. Шамов).

А в качестве формулы расхода взвешенных наносов в нормативах и прикладных трудах предлагаются формулы расчета транспортирующей способности потока. В учебной же и научной литературе для расчета расхода взвешенных наносов представлено уравнение распространения примеси, основанное на диффузионной теории движения наносов (Дж. Тейлор, В. Шмидт, В.М. Маккавеев, А.В. Караушев). Однако, ни в первом случае (формулы транспортирующей способности потока), ни во втором (уравнение распространения примеси) задача расчета концентрации взвешенного вещества в потоке в окончательном виде не решена. Очевидно, что взвесенесущая нагрузка речного потока не всегда соответствует его транспортирующей способности. Также и уравнение распространения примеси, являющееся элементарным уравнением неразрывности при уже известной концентрации взвешенного вещества в потоке, оставляет вопрос оценки этой концентрации открытым. Некоторые попытки выводы формулы расчета расхода взвешенных наносов также прошлого века были также основаны на знании информации о концентрации взвешенных наносов в придонном слое s_0 и фактически сводились к интегральному расчету эпюры концентрации взвешенных наносов s .

В целом, недостаточное внимание к проблеме разработки формул расхода взвешенных наносов вызывает недоумение. Поскольку в отличие от низкой точности измерения расхода влекомых наносов и, как следствие, наличие определенных сложностей с построением и верификацией соответствующих формул и калибровки параметров этих формул, точность измерения расхода взвешенных наносов достаточно высока, имеет уже весьма продолжительный период в инструментальном исследовании речных потоков и систематический характер.

Определенное пренебрежение вниманием к расчетным методам расхода взвешенных наносов можно объяснить тем, что ряд ученых полагал влияние на процессы переформирования дна (русловые процессы) исключительно влекомых наносов, тогда как взвешенные рассматриваются лишь в качестве транзитных. «Необходимость четкого разграничения взвешенных и донных наносов при морфологическом рассмотрении вопроса вытекает из того, что эти наносы играют различную роль в русловом процессе. Донные наносы формируют русло, и в деформациях, происходящих в самом русле, взвешенные наносы практически не участвуют» [3].

Однако, вопрос несомненного вклада взвешенных наносов в процессы формирования русла в настоящее время признан многими исследователями (см. выше).

В качестве объектов исследования было выбрано шесть североамериканских рек, результаты расчетов общего расхода наносов по которым уже приводились в настоящей работе. Эти реки характеризуются крайне незначительным вкладом расхода влекомых наносов в общий расход наносов. Этот вклад составляет от 0.3 до 9.5%, то есть находится в пределах точности измерения.

Среднее относительное отклонение по всем исследуемым водотокам составило 41% (аналитическая формула расхода наносов [7]), 51% (формула А.В. Караушева), 58% (формула Бэгнольда), 62% (формула Ван Рейна), 83% (формула Карима-Кеннеди), 97% (формула

Энгелунда-Хансена). Расчеты по формуле И.Ф. Карасева показали большие отклонения – превышение над наблюдаемыми расходами наносов для ряда водотоков составило более 1000%.

Выводы.

Основой успешного моделирования русловых деформаций является правильное понимание и соответствующая математическая интерпретация процессов, определяющих эти деформации. Одним из таких процессов, несомненно, является перенос речным потоком твердого вещества – наносов. При имеющемся многообразии формул расхода влекомых наносов, достаточном количестве формул общего расхода наносов и относительно небольшом наборе формул расхода взвешенных наносов качество расчетов по этим формулам является очевидно недостаточным. Определенный вклад в соответствие рассчитанных и наблюдаемых значений привносит также и точность измерения расхода взвешенных и влекомых наносов. Например, при очевидно более высокой точности измерения расхода взвешенных наносов, формулы, имеющие теоретическую основу, показывают значительно лучшие результаты, чем теоретические формулы при расчете расхода влекомых наносов. Также, как и в расчетах по формулам общего расхода наносов, в формулах расхода взвешенных наносов в 89% случаев разброс всех значений среднего относительного отклонения по водотокам не превышает 100%.

Литература

1. Караушев А. В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеиздат. 1960. 392 с.
2. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СО 34.21.204 – 2005
3. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Том 1: Русловые процессы: факторы, механизмы, формы проявления и условия формирования речных русел. Москва: URSS, 2011. 960 с.
4. <http://pubs.usgs.gov/of/1989/0067/report.pdf>
5. Шмакова М.В. Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб: Издательство Лема, 2013. 142 с.
6. Поздняков Ш.Р. Проблемы расчета и измерения характеристик наносов в водных объектах. СПб: Лема, 2012. 226 с.
7. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб: Нестор-История, 2011. 544 с.
8. Кондратьев Н.Е. Русловые процессы рек и деформации берегов водохранилищ. С.-Петербург: Изд. «Знак», 2000. 258 с.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2018-0003 (№ гос. регистрации: № 01201363379) при частичном финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета.

The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Scientific Education of the Russian Academy of Sciences on the subject No. 0154-2018-0003 (state registration number: No. 01201363379) with partial financial support from the federal budget.