

Магомедова А.В., Магомедова М.Р.

О ФАКТОРАХ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИХ ПРОЦЕСС ТРАНСПОРТА РУСЛОФОРМИРУЮЩИХ НАНОСОВ

Magomedova A.V., Magomedova M.R.

ABOUT FACTOR, CONDITIONING PROCESS OF THE TRANSPORT CHANNEL-FORMING SEDIMENTS

В данной статье на основе анализа литературных источников и обобщения экспериментальных и натурных данных уточнены основные факторы, влияющие на процесс транспорта руслоформирующих наносов. Процесс транспорта руслоформирующих наносов является одним из сложных физических процессов, обусловленных множеством факторов: гидромеханических характеристик водного потока и физико-механических характеристик наносов, что является причиной отсутствия единой теории этого процесса, сложности многочисленных расчетных методов определения расхода наносов и большого расхождения в результатах расчетов по ним.

Ключевые слова: *транспорт наносов, донные наносы, взвешенные наносы, диаметр частиц наносов, гранулометрический состав, турбулентный поток.*

In given article on base of the analysis of the literary sources and generalization experimental and натурных given are elaborated main factors, influencing upon process of the transport channel-forming sediments. The Process of the transport channel-forming sediments is one of the complex physical processes, conditioned by ensemble factor: an hydromechanical of the features of the water flow and physico-mechanical features alluvium that is a reason of the absence to united theory of this process, difficulties of the multiple accounting methods of the determination of the consumption sediment and big divergence in result calculation on him.

Key words: *sediment transport, bed load, suspended load, diameter of the particles sediment, granulometric composition, turbulent flow.*

Процесс транспорта руслоформирующих наносов в турбулентном потоке является одним из сложных физических процессов, обусловленных множеством факторов: гидромеханических характеристик водного потока и физико-механических характеристик наносов; геометрический размер частиц наносов, форма частиц, плотность частиц грунта, плотность русловых отложений, гидравлическая крупность, средняя скорость потока, допускаемая неразмывающая донная скорость потока, фактическая донная скорость потока, относительная шероховатость русла, коэффициент подвижности наносов, вес частиц, гранулометрический состав грунта, глубина потока, уклон, расход воды, грядовая форма дна, параметр турбулентности зерен наносов и т. д.

Теоретические и экспериментальные исследования движения наносов в турбулентном потоке (Г.А.Эйнштейн, М.А. Великанов, А. Шильдс, Е. Мейер-Петер, Г.К. Джильберт, И.В. Егiazаров, И.И. Леви, Ц.Е. Мирцхулава, А.В. Караушев, Н.А. Михайлова, В.Н. Гончаров, К.В. Гришанин, К.И. Россинский, А.В. Магомедова, Н.Н. Гришин, В.С. Вербицкий, Н.И. Алексеевский и др.) с самого начала велись в двух направлениях: изучение донного влечения наносов и изучение взвешивания частиц и их переноса. По мнению ряда исследователей, такое разделение не совсем правильно, так как вследствие переноса твердых частиц турбулентными (вихревыми) возмущениями в потоке постоянно происходит обмен частицами руслоформирующих наносов между дном и

основной толщей потока, за исключением частиц неруслоформирующих фракций; при этом основной формой перемещения твердых частиц считают скачкообразное движение наносов (сальтацию), а донное влечение и взвешивание – предельными случаями сальтации при бесконечно малой и бесконечно большой длинах скачков (М.А. Великанов). При неоднородном по крупности гранулометрическом составе наносов в потоке одновременно имеют место все три вида движения [1, 5, 8].

Характер движения твердых частиц после срыва со дна – влечение, качение, сальтация вблизи дна или движение в толще потока в качестве взвешенных наносов, – зависит от запаса кинетической энергии, сообщенной частицам при срыве, и от величины сил, действующих на них во время движения. Различие между движением влекомых (перекатывающихся с остановками по дну), полувзвешенных (сальтирующих) и взвешенных наносов (поднимающихся в толщу потока и периодически вновь опускающихся ко дну) заключается в высоте и длине совершаемых твердыми частицами скачков [2].

Гидродинамическое воздействие потока на неподвижные частицы грунта на дне, вызванные несимметричным обтеканием частиц жидкостью, значительным градиентом скоростей в придонной области, наличием вихреобразования и другими факторами, приводит к появлению гидродинамических сил и сил сопротивления отрыву. Если частица лежит вровень с другими, то, как полагают ряд исследователей [1, 2, 5, 10], основную роль в силовом воздействии потока на эту частицу играет импульс подъемной силы, который вызывает срыв частицы и подъем ее на небольшую высоту над дном. Под действием силы тяжести и сопротивления воды, после прекращения действия подъемной силы, как только частица поднимется над дном, ускоренное движение сменяется замедленным, разность давлений исчезает и частица снова опускается на дно, т.е. падение частиц совершается под действием силы тяжести, а их подъем – против силы тяжести (Великанов, 1955). Поэтому влекомые наносы перемещаются короткими скачками. Вращательное движение частиц может сопровождаться действием дополнительной подъемной силы, называемой силой Магнуса [4].

Показатели, характеризующие процесс транспорта наносов, объединяют, в основном, в две группы факторов: характеристики турбулентности потока и физико-механические свойства грунтов. Исследования существующих факторов велись на основе теоретических, экспериментальных и чисто эмпирических методов.

Основными характеристиками физико-механических свойств русловых грунтов и наносов являются: средний диаметр частиц, гидравлическая крупность, плотность материала частиц и русловых отложений, гранулометрический состав грунта [8].

Важнейшей характеристикой транспорта наносов является гидравлическая крупность – скорость равномерного падения зерен наносов в спокойной воде, зависящая от диаметра частиц, удельной плотности материала и формы зерен [7]. Сложный характер взаимодействия твердых частиц с водным потоком привел к многообразию формул для расчета гидравлической крупности наносов, начиная с 1850 г. Исследованием и созданием шкал гидравлической крупности занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Б.В. Архангельский, Г. Н. Лапшин, В.Н. Гончаров и др. В.Н. Гончаров, детально рассмотрев вопросы о режимах осаждения, построил шкалу гидравлической крупности наносов в воде в зависимости от диаметра частиц наносов при температурах воды 5, 10, 15 и 20⁰С. На основе этой шкалы для расчета на ЭВМ гидравлической крупности на языке FortranPowerStation создан модуль Fall_velocity.

Среди существующих формул наиболее приемлемым для практического использования является способ выражения гидравлической крупности через стандартную гидравлическую крупность, предложенный В.Н. Гончаровым:

$$w = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{2g(\rho_2 - \rho)d}{1,75\rho}}, \quad (1)$$

где φ – параметр турбулентности, показывающий во сколько раз меньше действительная скорость падения в сравнении с той, которой обладали бы наносы при турбулентном режиме их падения. Расчет параметра турбулентности φ в зависимости от температуры (5, 10, 15 и 20 градусов по Цельсию) принят по шкале, предложенной В.Н. Гончаровым. Для численной реализации на ЭВМ, на языке FortranPowerStation создан модуль Fall parameter. При $d > 1,5$ мм, $\varphi = 1$; в диапазоне 0,15 – 1,5 мм параметр турбулентности определяется по формуле [3]:

$$\varphi = \frac{1}{\beta} \sqrt[3]{\frac{\rho\mu}{\rho_1 - \rho}} \sqrt{\frac{2g}{1,75\rho d}}; \quad (2)$$

для частиц $d < 0,15$ мм φ определяется по формуле:

$$\varphi = \frac{33,8}{\sqrt{1,75\rho(\rho_1 - \rho)d^3}}. \quad (3)$$

С уменьшением крупности зерен значение φ возрастает, доходя при $d < 0,01$ мм до $\varphi = 300$.

Плотность частиц грунта, определяющая содержание массы частиц в единице объема, играет важную роль в процессе транспорта руслоформирующих наносов. Плотность частиц грунта зависит от их минералогического состава, для глинистых частиц и песков изменяется соответственно в пределах 2000 – 4500 кг/м³. Для речных песков в среднем принимают 2650 кг/м³. Плотность отложений наносов зависит от их фракционного состава: для заиленных песков – 1100...1500 кг/м³, для песчаных грунтов – 1500...1800 кг/м³, для песчано-гравелистых грунтов – 1800...2100 кг/м³, для гравийно – галечниковых грунтов – 2000...2400 кг/м³ [8].

Речные наносы представляют собой частицы различных размеров и форм. Форма частиц зависит от диаметра наносов, от степени механической обработки в процессе движения и играет во взаимодействии частиц с потоком значительную роль. Существуют различные морфологические критерии, характеризующие форму частиц: удлиненность, уплощенность, окатанность, сферичность, шарообразность и др. [8].

Диаметр частиц наносов является важнейшей характеристикой наносов. Определяющим геометрическим размером частиц является средний диаметр, соответствующий размеру круглых или квадратных сит, а не самих частиц [7]. В.Н. Гончаровым предложена следующая классификация наносов по размерам частиц (табл. 1) [3].

В реках всегда транспортируются наносы различного размера, поэтому определение лишь одного среднего диаметра частиц представляется недостаточным.

Одним из важных факторов, влияющих на процесс транспорта наносов, является их гранулометрический состав. Достоверную информацию о гранулометрическом составе грунта дают плотность и функция распределения размеров частиц [8]. Гранулометрический состав русловых грунтов и наносов характеризуется средневзвешенным диаметром частиц d_{cp} , позиционными диаметрами интегральной гранулометрической кривой d_{95} , d_{99} , которым соответствуют ординаты гранулометрической кривой $P = 95\%$ и 99% . Коэффициент однородности грунта $k_0 = d_{cp} / d_5$, где d_5 – средний диаметр крупных фракций, содержание которых в грунте составляет 5%, он определяет шероховатость русла.

При $k_0 > 0,8$ грунт считается однородным, при $k_0 < 0,8$ – неоднородным. Диаметры частиц наносов в поверхностном слое, их форма и гранулометрический состав грунта обуславливают значение шероховатости русла. При зернистой шероховатости, образованной потоком в русле из однородного несвязного грунта, среднюю высоту выступов шероховатости определяют по зависимости [3]: $\Delta = 0,7 d_{cp}$; для неоднородных по крупности несвязных грунтов $\Delta = 0,7 d_5$.

Таблица 1 - Классификация наносов по диаметрам

№ № п/п	Наименование фракций	Крупность, мм
1	Глина	0,0015 ÷ 0,005
2	Ил мелкий	0,005 ÷ 0,015
3	Ил крупный	0,015 ÷ 0,05
4	Песок мелкий	0,05 ÷ 0,15
5	Песок средний	0,15 ÷ 0,50
6	Песок крупный	0,50 ÷ 1,5
7	Гравий мелкий	1,5 ÷ 5,0
8	Гравий крупный	5,0 ÷ 15
9	Галька мелкая	15 ÷ 50
10	Галька	50 ÷ 150
11	Валуны мелкие	150 ÷ 500
12	Валуны средние	500 ÷ 1000
13	Валуны крупные	>1000

На основе экспериментальных и натуральных исследований предложено большое количество формул для определения неразрывающих скоростей потока. Впервые определение этих скоростей (непередвигающей и срывающей) дано В.Н. Гончаровым [3]: непередвигающая скорость – наибольшая скорость потока, при которой зерна на дне еще не перемещаются; срывающая скорость – та наименьшая скорость потока, при которой уже происходит непрерывный срыв отдельных зерен на дне.

Нормативными документами рекомендована для использования формула Ц.Е. Мирцхулава для определения допускаемой неразрывающей донной скорости потока для несвязных грунтов:

$$V_{\Delta n, \text{дон}} = 1,25 \sqrt{\frac{2m_1}{0,44 \rho n_p} [g(\rho_2 - \rho)d + 2C_{ун}^n k_1]}, \quad (4)$$

где d – диаметр частиц грунта, м; ρ_2 и ρ – плотность материала частиц грунта и воды, кг/м³, $C_{ун}^n$ – нормативная усталостная прочность несвязного грунта на разрыв, Па; m_1 , n_p , k_1 – соответственно коэффициенты условий работы русла, перегрузки и однородности сил сцепления. Коэффициент перегрузки для частиц $d < 1$ мм определяем по эмпирической формуле [5]:

$$n_p = 1 + \frac{1}{0,3 + [v^2 / (gd^3)]^{1/3}}, \quad (5)$$

для частиц $d \geq 1 \text{ мм}$ $n_p = 4$.

Результаты многочисленных исследований показали, что подвижность наносов хорошо характеризуется отношением средней скорости течения к гидравлической крупности наносов V/w .

Режим движения наносов, их перемещение в потоках, взаимодействие текущей воды и русла в весьма значительной степени зависят от гидравлических элементов потока: от расхода потока, удельного расхода, ширины потока, глубины потока, средней скорости потока и распределения скоростей по вертикали, от характеристик турбулентности потока.

Начало и интенсивность движения придонных наносов зависят от соотношения допускаемой неразмывающей донной скорости $V_{\Delta \text{дон}}$ и осредненной во времени фактической донной скорости \bar{u}_{Δ} . Последняя определяется в зависимости от закона распределения местных скоростей по глубине потока. При логарифмическом законе распределения местных скоростей [3]:

$$\frac{\bar{u}}{V} = \frac{\lg(16,7y/\Delta + 1)}{\lg(6,15h/\Delta)}. \quad (6)$$

Донная скорость потока \bar{u}_{Δ} на высоте выступов шероховатости $\Delta = 0,7d$ при однородном составе русловых отложений определяется по формуле:

$$\bar{u}_{\Delta} = \frac{1,25V}{\lg(8,8h/d)}. \quad (7)$$

Согласно экспериментальным данным, мгновенные скорости течения подчиняются нормальному закону распределения [8]:

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \exp\left[-\frac{(u - \bar{u})^2}{2\sigma_u^2}\right], \quad (8)$$

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left[-\frac{(v)^2}{2\sigma_v^2}\right], \quad (9)$$

где $f(u)$ и $f(v)$ – одномерные плотности распределения горизонтальной $u(t)$ и вертикальной $v(t)$ составляющих мгновенной скорости; $\sigma_u = \sqrt{(\overline{u'})^2}$ и $\sigma_v = \sqrt{(\overline{v'})^2}$ – средние квадратические отклонения этих составляющих; $u' = u - \bar{u}$, $v' = v$ – пульсационные скорости.

Для расчета транспорта руслоформирующих наносов необходимо знать структуру, размер, частоту и длительность крупномасштабных турбулентных вихревых образований в потоке. Статистические характеристики турбулентных образований получаем на основе анализа корреляционных и спектральных функций Эйлеровых и Лагранжевых скоростей течения.

По результатам многолетних исследований процессов осаждения твердых частиц в турбулентных потоках, проведенных в МГУ, как в натуральных, так и лабораторных условиях, получено, что одним из важных параметров, характеризующих взвешенное состояние частиц является вертикальная скорость осаждения твердых частиц.

Средняя частота пульсаций Эйлеровой скорости \bar{v}_u зависит от средней скорости и глубины потока и определяется через опытное значение числа Струхала $Sh = 0,73$: $\bar{v}_u = 0,73V/h$.

Распределение максимальных значений мгновенной скорости течения описывается законом Релея [8]:

$$f_m(u_m) = \frac{u_m - \bar{u}}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(u_m - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right], \quad u_m > \bar{u}, \quad (10)$$

где \bar{u} – осредненная во времени местная скорость, u_m – максимальное значение продольной составляющей скорости.

С учетом закона Релея, выражение для математического ожидания максимальных значений продольной составляющей донной скорости течения, определяемое по формуле [8]:

$$\bar{u}_m = \int_0^{\infty} u_m \cdot f_m(u_m) du_m, \quad (11)$$

принимает вид:

$$\bar{u}_{\Delta m} = \bar{u} + \sqrt{\pi/2}\sigma_{u_{\Delta}}; \quad (12)$$

Аналогично, выражение математического ожидания максимальных значений вертикальной составляющей скорости в придонной области имеет вид:

$$v_m = \sqrt{\pi/2}\sigma_v, \quad (13)$$

где $\sigma_{u_{\Delta}}$ и σ_v – соответственно средние квадратические отклонения продольной и вертикальной составляющих донной скорости, согласно экспериментальным данным равные:

$$\sigma_{u_{\Delta}} = 0,33\bar{u}_{\Delta}, \quad \sigma_v = 0,15\bar{u}_{\Delta} \quad (14)$$

В результате натурных исследований на реках бассейнов Сев. Двины, Волги, Оби, Лены и Яны [9] построены графики зависимости числа Лохтина (Л) и морфометрического параметра Глушкова (Г) от удельной величины расхода влекомых наносов. Увеличение устойчивости русла соответствует снижению подвижности наносов, уменьшению расхода влекомых наносов и их среднегодовой концентрации, в тоже время величина параметра Глушкова, отражающая соотношение ширины b_p и глубины h русла прямо пропорциональна удельной концентрации влекомых наносов в потоке.

Сложность механизма взаимодействия турбулентного потока с несвязным грунтом увеличивается в связи с тем, что транспорт наносов почти всегда сопровождается образованием на дне подвижных форм – рифелей и гряд, изменяющих кинематическую структуру потока, и следовательно, влияющих на характер и количественные закономерности движения твердых частиц. Экспериментально установлено, что расход влекомых наносов существенно меняется в зависимости от формы гряд (рифели, дюны, заструги и т.д.).

Формирование гряд, их тип, а также статистические характеристики их размеров определяются гидравлическим режимом, кинематической структурой потока и физико-механическими свойствами донных отложений. Отсутствие единой точки зрения в вопросе механизма образования и развития различных типов гряд, а также несовершенство теоретических моделей этого процесса обусловили широкое использование в русловых процессах эмпирических критериев и формул для определения типа и параметров гряд, полученных на основе опытных и натурных исследований.

В 2008 г. ГГИ[6] были выполнены натурные исследования на различных участках нижней части реки Кубань, в ходе которых измерялись геометрические характеристики гряд, глубины и скорости потока над грядами и гранулометрический состав наносов, слагающих эти гряды, в результате чего построен график зависимости и получена формула полного расхода наносов от расхода воды:

$$Q_T = 0.0000002Q^3 - 0.0002Q^2 + 0.53Q - 39 \quad (15)$$

Учитывать все многообразие влияющих на транспорт наносов факторов практически невозможно, поэтому в существующих методах расчета ограничиваются основными параметрами.

Выводы

Обобщение экспериментальных данных ряда исследователей, анализ литературных источников привели к выводу, что процесс транспорта руслоформирующих наносов является одним из сложных физических процессов, обусловленных множеством факторов: гидромеханических характеристик водного потока и физико-механических характеристик наносов, что является причиной отсутствия единой теории этого процесса, сложности многочисленных расчетных методов определения расхода наносов и большого расхождения в результатах расчетов по ним.

На современном этапе развития гидравлики и инженерной гидрологии одним из оптимальных путей получения представлений о качественном и количественных закономерностях этого процесса является использование теории вероятностей, теории случайных процессов и методов многомерного статистического анализа.

Библиографический список:

1. Великанов М.А. Русловой процесс. М.: 1958. – 395 с.
2. Великанов М.А. Движение наносов. М.: МРФ СССР, 1948.
3. Гончаров В.Н. Движение наносов. – Л.: Гидрометеиздат, 1938.
4. Гришин Н.Н. Механика придонных наносов. М.: Наука, 1982. – 160 с.
5. Караушев А.В. Теория и методы расчета речных наносов. Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 272 с.
6. Копалиани З.Д., Жук М.М. К проблеме оценки стока руслового материала в реках // Журнал университета водных коммуникаций. –2010.-С.74-89.
7. Лапшенков В.С. Русловая гидротехника. – Новочеркасск: Изд-во НГМА, 1999. – 408 с.
8. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – 203 с.
9. Чалов Р.С. Сток наносов, транспортирующая способность потоков и их роль в формировании речных русел. // География и природные ресурсы. -2011. - №3. -С.20-27.
10. Einstein H.A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. – U.S. Dept. Agriculture Soil Cons. Serv. Techn. Bull. – 1950.