

1 – однопролетная водосливная плотина, водобой, рисберма; 2 – однопролетная водосливная плотина, водобой, бетонная рисберма, бетонные стены-устои; 3 – многопролетная водосливная плотина, водобой, бетонные стены-устои, бетонная рисберма; 4 – многопролетная водосливная плотина, водобой, бетонные стены-устои, каменная рисберма и концевое крепление.

Замена в расчетной схеме однопролетной плотины на многопролетную, приводит к незначительному увеличению удельных экономических расходов, а введение в расчеты концевого крепления практически не влияет на значение  $q_{эк}$ . Это наглядно видно на рисунке 1.

**Вывод.** На основании результатов проведенного анализа можно сделать вывод, что на значение удельных экономических расходов наиболее существенное влияние оказывают только стены-устои.

### **Библиографический список:**

1. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. В 2 ч. Водосливные плотины. – М., 1985.
2. Курбанова З.А. Методика и программный комплекс для расчетов оптимальных параметров сооружений водосливно-фронтных низконапорных водосливных плотин /З.А. Курбанова, И.А-Г. Сулейманов, А.В. Магомедова // Вестник ДГТУ – 2010. – №17. – С. 52-60.
3. Курбанова З.А. Зависимость удельных расходов бетонных низконапорных водосливных плотин от различных факторов. // Вестник ДГТУ - 2012. – №25. – С. 79-85.
4. Курбанова З.А. Влияние удельных расходов водосливных плотин на не скальном основании на величину размывов русла в нижнем бьефе. // Вестник ДГТУ - 2013. – №29. – С. 65-70.

**УДК 556.536:631.4**

*Магомедова М.Р.*

### **ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ АВТОРСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТА МИНЕРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ**

*Magomedova M.R.*

### **PRACTICAL APPLICATION OF AUTHOR'S MODEL TRANSPORT OF MINERAL PARTICLES**

*В данной статье даны результаты сопоставления математической модели движения наносов в руслах рек и каналов. Выполненный сопоставительный анализ существующих методов определения расхода наносов на*

материале натуральных и экспериментальных исследований свидетельствует о наличии значительных расхождений между ними, иногда даже в оценке порядка рассчитываемых величин.

**Ключевые слова:** транспорт наносов, взвешенные наносы, водохранилище, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток, средняя глубина.

*In the paper are presented the results of comparison of the mathematical model of drift movement in the riverbeds and channels. Performed the comparative analysis of the existing methods of sediment discharge on the materials of full-scale and experimental studies, testify to the presence of significant divergence between them, sometimes even in the estimation of the calculable values.*

**Key words:** drift transport, suspended drift, reservoir, granulometric composition, current speed, drift discharge, turbulent flow, average depth.

Несмотря на более чем вековую историю развития исследований транспорта наносов и большое число экспериментальных и натуральных работ в этом направлении, проблему расчета расхода руслоформирующих наносов нельзя считать удовлетворительно решенной.

Существующие методы и формулы не обеспечивают, как полного учета всех факторов, так и удовлетворительного соответствия математических моделей реальному процессу движения разнозернистых наносов в естественных речных руслах [7].

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.

С учетом стохастического характера турбулентности водных потоков и неоднородности гранулометрического состава русловых отложений, была разработана оригинальная математическая модель, основанная на представлении о срыве со дна и переносе частиц наносов крупномасштабными турбулентными возмущениями, амплитудные и частные характеристики которых определяют параметры траекторий движения наносов и их концентрацию в потоке. Характеристики турбулентных возмущений и осредненные параметры транспорта руслоформирующих наносов определяются с помощью методов теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов [5].

С использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона распределения их максимумов, получена формула удельного расхода наносов в параметрической форме:

$$q_T = \rho_{отл} d V_{\Delta \text{дон}} \varphi(\bar{u}_\Delta / V_{\Delta \text{дон}}), \quad (1)$$

где  $\rho_{отл}$  – плотность русловых отложений, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр частиц грунта, м;  $\bar{u}_\Delta$  – осредненное значение продольной составляющей донной скорости, м/с;  $V_{\Delta \text{дон}}$  – допускаемая неразмывающая скорость, м/с;

Одной из причин расхождения между экспериментальными и теоретическими данными является также условность в делении наносов на придонные (влекомые и полувзвешенные) и взвешенные, при отсутствии критериев этих видов движения, которые необходимы для обеспечения достоверности модели [1, 2, 3, 7].

На этой основе с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона распределения их максимумов предложены критерии видов движения руслоформирующих наносов [6,8] (табл. 1).

**Таблица 1 - Критерии видов движения руслоформирующих наносов**

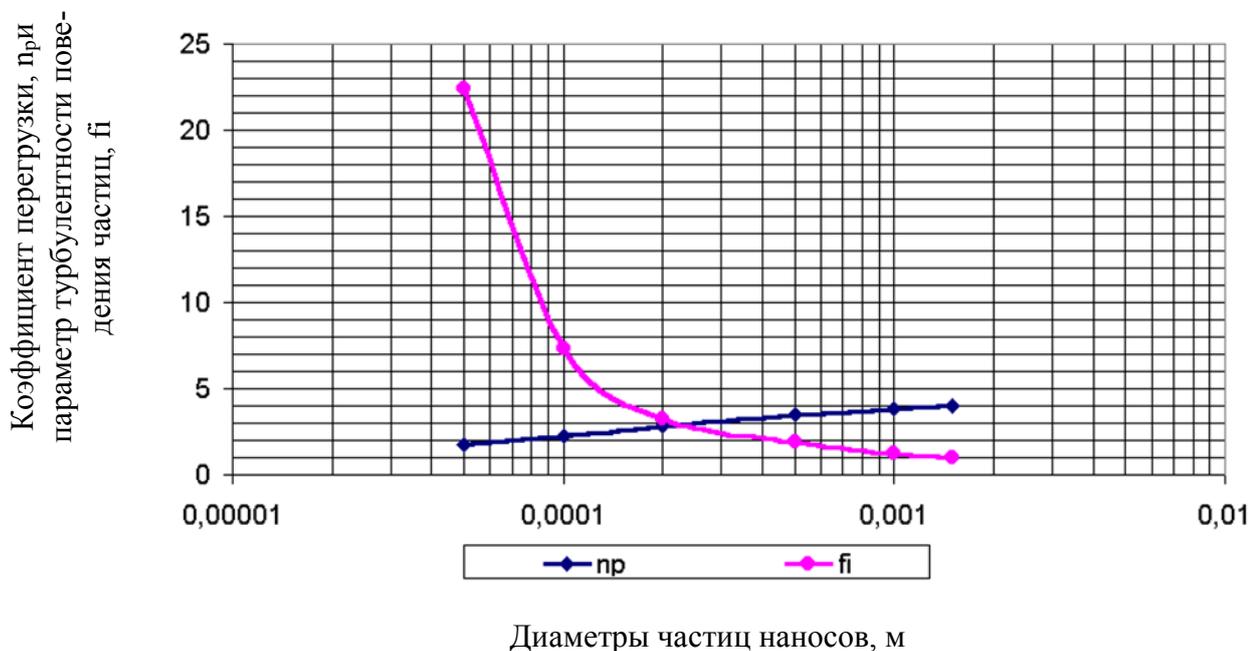
Влекомые	Полувзвешенные	Взвешенные
$u_{\Delta n} \leq \bar{u}_{\Delta n}; w > v_{\max}$	$v_{\max} \geq w > \bar{v}_m$	$\bar{v}_m \geq w$
$1.0 \leq u_\Delta / V_{\Delta n.дон} < 1.8 / \varphi$	$1.8 / \varphi \leq u_\Delta / V_{\Delta n.дон} < 4.3 / \varphi$	$4.3 / \varphi \leq \bar{u}_\Delta / V_{\Delta n.дон}$
$5.3 \geq w / \sigma_v > 3.0$	$3.0 \geq w / \sigma_v > 1.25$	$1.25 \geq w / \sigma_v$

Уточнены критерии видов движения по относительной донной скорости введением в них параметра турбулентности поведения твердых частиц в воде  $\varphi$ , гидравлической крупности частиц  $w$ , коэффициента перегрузки  $n_p$ , допускаемой неразмывающей скорости  $V_{\Delta n.дон}$ , что значительно расширило диапазон изменения размеров частиц наносов, для которых применены указанные критерии (табл. 2).

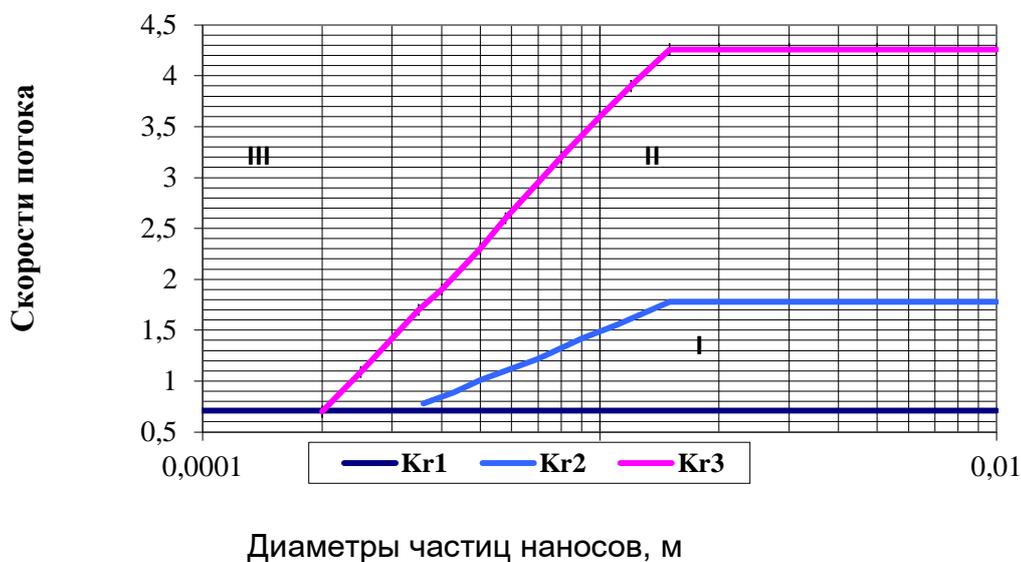
**Таблица 2 - Критерии видов движения руслоформирующих наносов**

Тип критерия	Критерии начала движения влекомых наносов, Kr1	Критерии перехода от влекомых к полувзвешенным наносам, Kr2	Критерии перехода от полувзвешенных к взвешенным наносам, Kr3
Вероятностные критерии	$Вер.(u(t) \geq u_{\Delta n}) = 0,001$ $u_{\Delta \max} > u_{\Delta n}$	$Вер.(v(t) \geq w) = 0,001$ $v_{\max} \geq w$	$Вер.(v(t) \geq w) = 0,1$ $\bar{v}_m \geq w$
Критерии по относительной гидравлической крупности	$w / \sigma_v \leq 5,3$	$w / \sigma_v \leq 3,0$	$w / \sigma_v \leq 1,25$
Критерии по относительной донной скорости	$\frac{\bar{u}_\Delta}{V_{\Delta n.дон}} \geq 0,71$	$\frac{\bar{u}_\Delta}{V_{\Delta n.дон}} \geq \frac{0,89 \sqrt{n_p}}{\varphi}$	$\frac{\bar{u}_\Delta}{V_{\Delta n.дон}} \geq \frac{2,13 \sqrt{n_p}}{\varphi}$

Так как в критериях перехода между видами движения наносов  $n_p$  и  $\varphi$  зависят от диаметра частиц  $d$ , то критерии перехода также являются функциями диаметра частиц. С учетом графиков зависимости  $\varphi = f(d)$  и  $n_p = f(d)$  (рис. 1), по критериям, приведенным в табл. 2, установлены зоны видов движения руслоформирующих наносов (рис. 2).



**Рисунок 1** - Зависимость коэффициента перегрузки  $n_p$  и параметра турбулентности  $\varphi$  от диаметра частиц  $d$



**Рисунок 2** - Зоны видов движения руслоформирующих наносов:  
 I – влекомые наносы, II – полувзвешенные наносы,  
 III – взвешенные наносы

Достоверность полученных результатов исследования подтверждается практическим их использованием при исследованиях русла реки Гизельдон при реконструкции Гизельдонской ГЭС.

Для расчета распространения шлейфа мутности в реке Гизельдон необходимо было определить:

1. Объемы загрязняемой воды, протекающей в шлейфах взвеси с концентрацией выше заданной, — «проточные объёмы» (ПО).
2. Время существования шлейфов взвеси с концентрацией выше заданной.
3. Площади дна, покрываемые слоем отложений взвешенных веществ.
4. Длительность воздействия на частицы грунта срывающих возмущений.
5. Длительность срыва частиц.
6. Частота срывающих возмущений.
7. Средняя скорость продольного переноса наносов.
8. Высота подъема наносов.
9. Длительность переноса наносов.
10. Дальность переноса.
11. Общий расход наносов.

Река Гизельдон расположена на территории Пригородного и Плагирского районов Республики Северная Осетия-Алания, берет начало от ледников северных склонов г. Мидаграбинхох Кавказского хребта и впадает в реку Ардон в 0,2 км от впадения Ардона в Терек.

Гизельдонское водохранилище образовано перекрытием русла р. Гизельдон плотиной и подъемом горизонта воды до отметки НПУ 1351,85 м.

Для характеристики стока воды использованы материалы наблюдений по гидрологическому посту р. Гизельдон – с. Даргавс, расположенный в 5 км выше плотины головного сооружения Гизельдонской ГЭС и в 8,5 км выше станционного сооружения Гизельдонской ГЭС.

Охватываемый диапазон изменения гидравлических характеристик потока, следующий: расход воды в р. Гизельдон  $Q = 2,16...11,20$  м<sup>3</sup>/с, глубина потока  $h = 0,3...2,5$  м, ширина потока  $b = 3,5$  м, средняя скорость потока  $V = 0,5-1$  м/с, диаметр частиц наносов  $d = 0,005...2$  м, измеренный уклон на участке  $i = 0,011...0,092$ , коэффициент шероховатости  $n = 0,042...0,096$ .

В естественных условиях, вследствие неупорядоченного расположения, а также различия размеров и форм, частицы несвязного грунта испытывают различное силовое воздействие со стороны потока: более возвышающиеся над соседними частицы испытывают большее усилие, менее возвышающиеся – меньшее. В явлениях захвата зерен со дна для относительно крупных зерен устанавливается избирательное действие донных вихрей, состоящее в том, что крупные зерна наносов захватываются со дна и поднимаются движущимися у дна вихрями больших размеров, а меньшие по величине зерна захватываются вихрями соответственно меньших размеров.

В шероховатых руслах захват зерен со дна и подъем их осуществляется механизмом вихревых областей, образующихся в углублениях за выступами шероховатости дна. Для частиц, крупнее толщины прилипшего слоя, известную роль играет явление подсакивания зерен, движущихся по дну, при встрече с выступами шероховатости дна. При достаточно больших скоростях своего движения зерна при встрече с выступами шероховатости могут не останавливаться, а подсакивать при ударе. Между нижней гранью частицы и дном потока происходит движение жидкости за счет разности напоров между передней и тыловой гранями. Сдвиг одной из частиц на поверхности дна есть случайное событие, связанное со случайным мгновенным превышением сдвигающих сил над удерживающими. Важным фактором, способствующим образованию гряд, служит динамическое затенение одних частиц другими. В местах, где в результате действия турбулентных пульсаций подвижные частицы расположены более густо, они защищают друг друга от воздействия течения, замедляют свое движение и вызывают накопление новых частиц; там, где подвижные частицы разрежены, поверхность дна с большей легкостью поддается эрозии. Этот процесс приводит к образованию гряд с крутым низовым откосом и пологим верховым, с продольным профилем, близким к треугольному [3, 4].

В результаты проведенных исследований с использованием математической модели движения руслоформирующих наносов, получены следующие результаты, представленные в таблицах 1-4:

**Таблица 1** - Объемы загрязняемой воды, протекающей в шлейфах взвеси с концентрацией выше заданной, — «проточные объёмы» (ПО), м<sup>3</sup>

	Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
Операция	≥0,1	≥0,05	≥0,02	≥0,01	≥0,005	≥0,001
Объем, W, м <sup>3</sup>	20300	10150	4060	2030	1015	202,9

**Таблица 2** - Расстояние от створа гидроузла до места выпадения осадков (заиление)

	Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
Операция	≥0,1	≥0,05	≥0,02	≥0,01	≥0,005	≥0,001
L, м	340	740	1850	3703,7	7407,4	37037

**Таблица 3** - Время существования шлейфов взвеси с концентрацией выше заданной, час

	Концентрация взвеси в воде, кг/м <sup>3</sup>					
Операция	≥0,1	≥0,05	≥0,02	≥0,01	≥0,005	≥0,001
Время, час	0,09	0,21	0,5	1,03	2,06	10,03

**Таблица 4** - Площади дна ( $m^2$ ), покрываемые слоем отложений взвешенных веществ

Операция	Толщина слоя осадков, м				
	$\geq 0,1$	$\geq 0,05$	$\geq 0,02$	$\geq 0,01$	$\geq 0,005$
S ( $m^2$ )	2380	5180	12950	25921	51849

Водохранилище подвержено быстрому заилению (6-7 лет). В связи со значительным заилением водохранилища промывку водохранилища от наносов планируется проводить в два этапа. На первом этапе расчистка осуществляется механическим способом с использованием экскаватора. На втором этапе применяется гидравлический способ с помощью земснаряда. Механическая расчистка осуществляется насухо при опорожненном водохранилище на площади 31,1 тыс.  $m^2$  в объеме 211,2 тыс.  $m^3$  грунта. Гидравлический способ расчистки водохранилища заключается в использовании земснаряда, который в виде пульпы по трубе, проложенной по водосбросному туннелю, сбросит 203 тыс.  $m^3$  наносов в нижний бьеф. Для минимизации ущерба работы по расчистке производятся во время максимальных паводковых расходов воды в реке с июня по сентябрь. Площадь расчистки составляет 50,3 тыс.  $m^2$ .

Для апробации разработанной математической модели транспорта руслоформирующих наносов были проведены численные эксперименты на алгоритмическом языке Fortran Power Station 4.0 с помощью программного комплекса Transport\_Sediment, который обеспечивает: расчет расхода руслоформирующих наносов для различных массивов исходных данных, заранее введенных в текстовые файлы; расчет характеристик гранулометрического состава наносов; разделение в процессе расчета массивов данных по критериям на донные, придонные и взвешенные наносы, а также на грядовый и безгрядовый режимы движения; расчет допустимой неразмывающей скорости потока; расчет характеристик транспорта руслоформирующих наносов.

**Вывод.** Учитывая большой диапазон изменения гидравлических характеристик потока и расходов наносов в анализируемых экспериментальных данных на основе результатов численных экспериментов можно сделать вывод, что разработанная математическая модель, основанная на вероятностном подходе с применением теории выбросов случайных процессов, в целом правильно отражает процесс транспорта наносов в открытых руслах.

#### **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. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: монография. – Махачкала: Алеф, ИП Овчинников М.А., 2014. –135 с.

6. Магомедова А.В., Гусейнова М.Р., Насибова Н.В. Разработка программного комплекса для расчета транспорта руслоформирующих наносов в речных руслах с использованием ГИС-технологий //Вестник Дагестанского государственного технического университета – 2009. – №15. – С.147-157.
7. Магомедова А.В., Магомедова М.Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов //Вестник Дагестанского государственного технического университета – 2013. – №29. – С.58-64.
8. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – 203 с.