

*Для цитирования:* Магомедова М.Р. Расчетная модель движения твердых частиц в природных турбулентных потоках. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 98-107. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

*For citation:* Magomedova M.R. Calculation model of solid particles motion in natural turbulent flows. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 98-107. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 556.536:631.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-98-107

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПРИРОДНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ

**Магомедова М.Р.**

Дагестанский государственный технический университет,  
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,  
e-mail: n-guseinova@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследования является совершенствование модели движения твердых частиц в природных турбулентных потоках. **Методы.** Совершенствование знаний о структуре водных потоков и характере русловых процессов привело к развитию взглядов на движение наносов, как на стохастический процесс, обусловленный случайным характером вызывающих его факторов: природно-климатическими и гидрологическими условиями, изменчивостью физико-механических свойств грунтов, турбулентностью водных потоков. В связи с этим при построении модели движения наносов использовались методы теории вероятностей и теории случайных процессов. **Результат.** На основе выполненных исследований разработана математическая модель переформирования естественных русел неустановившимся потоком, обеспечивающая более полный, по сравнению с существующими отечественными и зарубежными аналогами, учет факторов, влияющих на расход руслоформирующих наносов. Анализ математических моделей движения твердых частиц в водном потоке показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса (скачков) придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений и вихревых образований, с использованием математического аппарата. **Вывод.** Расчетная модель движения твердых частиц реализована на алгоритмическом языке Fortran Power Station и апробирована на материалах натурных и экспериментальных исследований в широком диапазоне гидравлических характеристик течения и физико-механических характеристик русловых грунтов.

**Ключевые слова:** турбулентный поток, руслоформирующие наносы, взвешенные наносы, донные наносы, скорость потока, расход наносов, математическая модель

## COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

### CALCULATION MODEL OF SOLID PARTICLES MOTION IN NATURAL TURBULENT FLOWS

**Milada R. Magomedova**

Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026,  
e-mail: n-guseinova@mail.ru

**Abstract. Objectives** Improving the model of movement of solid particles in natural turbulent flows. **Method** The improvement of knowledge about the structure of water flows and the nature of channel processes has led to the development of views on sediment movement as a stochastic process due to the random nature of the factors causing it: natural-climatic and hydrological conditions, variability of the physical and mechanical properties of soils, and turbulence of water streams. In this regard, the methods of probability theory and the theory of random processes were used to construct the model of sediment movement. **Result** Based on the studies, a mathematical model of the reformation of natural channels was established by an unsteady flow, which provides a more complete, in comparison with existing domestic and foreign counterparts, consideration of factors affecting the flow of channel-forming sediments. The analysis of mathematical models of the movement of solid particles in the water stream showed that the physical nature of the transport of channel-forming sediments is more consistent with the model based on the parameters of the trajectories of solid particles, namely, lengths, heights and transport time (jumps) of bottom and suspended sediments and their concentration in the stream. Such a model is implemented by integrating averaged equations and vortex formations using a mathematical apparatus. **Conclusion** The calculated model of the movement of solid particles is implemented in the algorithmic language Fortran Power Station and tested on the basis of field and experimental studies in a wide range of hydraulic flow characteristics and physical and mechanical characteristics of channel soils.

**Keywords:** turbulent flow, channel-forming sediment, suspended sediment, bottom sediment, flow rate, sediment flow rate, mathematical model

**Введение.** Вследствие сложного пространственно-временного характера аккумулятивных процессов в открытых потоках проблема их прогнозирования требует разработки и апробации математических моделей отдельных этапов этих процессов. При этом одними из главных задач являются полный учет всех факторов, влияющих на транспортировку руслоформирующих наносов, выявление взаимных связей между ними, более глубокое раскрытие физической сущности механизма взаимодействия потока и русла, определение статистических характеристик физико-механических свойств грунтов и турбулентности водных потоков. Отсутствие обобщающих исследований, которые объединяли бы разрозненные данные различных экспериментов, затрудняет возможность учета количественного ряда характеристик турбулентности при теоретическом анализе русловых процессов. Поэтому неизбежна схематизация изучаемых явлений, заключающаяся в выделении и учете только главных, преобладающих факторов, о которых можно судить с большей или меньшей достоверностью. Таким главным фактором в процессах взаимодействия потока и русла, по исследованиям многих ученых, является крупномасштабная турбулентность.

Задача повышения надежности расчетов движения наносов требует учета таких характеристик крупномасштабной турбулентности, как средние квадратические отклонения, корреляционные и спектральные функции, частоты пульсаций эйлеровой и лагранжевой составляющих скорости потока, а также масштабы вихревых образований.

Для анализа процесса движения наносов, необходимо определение статистических характеристик турбулентности. Мгновенные скорости течения подчиняются нормальному закону распределения [1, 2]:

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

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

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 расхода наносов необходимо знать структуру, размер, частоту и длительность крупномасштабных турбулентных вихревых образований в потоке.

Распределение максимальных значений мгновенной скорости течения описывается законом Релея [1]:

$$f_m(u_m) = \frac{u_m - \bar{u}}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{(u_m - \bar{u})^2}{2\sigma^2}\right], \quad u_m > \bar{u}. \quad (3)$$

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 [1]:

$$\bar{u}_m = \int_0^{\infty} u_m \cdot f_m(u_m) du_m, \quad (4)$$

принимает вид:

$$\bar{u}_{\Delta m} = \bar{u} + \sqrt{\pi/2}\sigma_{u_{\Delta}}; \quad (5)$$

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

$$v_m = \sqrt{\pi/2}\sigma_v, \quad (6)$$

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

$$\sigma_{u_{\Delta}} = 0,33\bar{u}_{\Delta}, \quad \sigma_v = 0,15\bar{u}_{\Delta}. \quad (7)$$

На концентрацию донных и взвешенных наносов наибольшее воздействие оказывают гидравлические сопротивления.

Несмотря на многолетний период исследований, проблема еще далека от окончательного решения. В качестве гряд многие ученые в своих исследованиях рассматривают те наибольшие формирования, которые сползают по поверхности побочной, или максимальные формирования, соизмеримые с шириной русла водотока при беспобочневом русле, т.е. в подходах авторов исключается влияние иерархии гряд на гидравлические сопротивления [13]. Учитывать все многообразие влияющих на расход руслоформирующих наносов факторов практически невозможно, поэтому в существующих методах расчета ограничиваются основными параметрами.

**Постановка задачи.** Оценку деформаций русел, определение руслоформирующих наносов в лабораторной практике в настоящее время выполняют преимущественно по результатам исследований на жестких гидравлических моделях. Очевидно, что эти оценки выполняются косвенным путем: на модели детально изучается скоростное поле потока, результаты пересчи-

тываются на натуру и далее анализируются в совокупности со сведениями о натуральных грунтах на данном участке реки. На основании такого анализа формулируется вывод о возможных размывах, аккумуляции или транзитном транспорте наносов на исследуемом участке реки. В ряде случаев оцениваются геометрические и динамические характеристики русловых форм [3].

В природных условиях размеры и форма русла, подвижность наносов, характеристики русловых форм, темпы плановых и глубинных деформаций являются результатом динамического взаимодействия потока и размываемого русла, сложенного из различных смесей наносов [4, 5].

В настоящее время имеется большое количество работ, посвященных тщательному изучению структуры потока с использованием современных приборов и математических методов. В то же время материалы, посвященные исследованию состава наносов очень скудны. До сих пор во многих случаях в качестве расчетного диаметра принимают средний диаметр смеси, что является одной из основных ошибок в расчетах транспорта наносов и русловых деформаций.

Известно, что русло водотоков сложено из различных типов разнородных песков и гравелисто-галечных материалов, движение которых по дну происходит преимущественно в грядовой форме. В существующих работах влияние неоднородности состава наносов на формирование гряд, их геометрические и динамические характеристики, а также гидравлические сопротивления потока не изучались.

Структурная форма перемещения наносов оказывается основной формой транспорта руслоформирующих наносов. Вместе с тем, это очевидное положение в существующих методах расчета характеристик транспорта наносов в реках, включая такую характеристику как расход наносов, до сих пор не получило доминирующего распространения и должного практического использования [4, 5, 7].

Также недостатком большинства распространенных за рубежом чисто стохастических моделей срыва и транспорта наносов - необходимость введения эмпирических параметров. В последнее время в ряде отечественных работ намечается синтез детерминистического и вероятностного подхода к рассматриваемой проблеме, который представляется наиболее перспективным, так как при этом учитывается как стохастический характер взаимодействия потока и русла, так и физическая природа этого взаимодействия [6].

**Методы исследования.** В основе методики расчета расхода руслоформирующих наносов турбулентным русловым потоком лежит представление о том, что срыв и перенос твердых частиц осуществляется вихревыми образованиями, амплитудные и частотные характеристики которых наряду с гранулометрическим составом русловых отложений определяют вид перемещения наносов и его количественные закономерности [7, 8].

Сложная структура турбулентных течений определяет случайный характер пространственно-временных гидродинамических полей скорости, давления, примесей. Для анализа транспорта наносов необходимы сведения о величине и распределении по сечению потока следующих статистических характеристик турбулентности: осредненных местных скоростей, средних квадратических отклонений составляющих мгновенных скоростей течения, корреляционных и спектральных характеристик пульсаций скорости.

Поэтому для определения параметров движения твердых частиц в турбулентном потоке рассматриваем стационарный случайный процесс, предполагая его непрерывным и дифференцируемым, так как физически реальные случайные процессы представляют собой непрерывные случайные функции времени.

Срыв и перенос твердых частиц в турбулентном потоке можно описать системой дифференциальных уравнений [1]:

$$m_3 \frac{du_q}{dt} = W_x - F_{mp}, \quad (8)$$

$$m_3 \frac{d\vartheta_q}{dt} = (\overline{P - G})_c \pm W_y, \quad (9)$$

где  $m_s$  - эффективная масса частицы с учетом присоединенных масс жидкости,  $m_s = \frac{\rho_s \pi d^3}{6}$ ,  
 $\rho_s = \rho_2 + 0,5\rho$ ;  $u_y$  и  $\mathcal{G}_y$  - осредненные по совокупности срывааемых однородных частиц горизонтальная и вертикальная составляющие скорости твердых частиц;  $(\overline{P-G})_c$  - осредненное в пределах срывающих возмущений значение разности между подъемной силой и весом частицы в воде;  $F_{mp}$  - сила трения, действующая на частицы грунта при качении и влечении по дну;  $W_x$  и  $W_y$  - осредненные по совокупности вихревых возмущений гидродинамические силы.

Пример реализации процесса  $P(t)$  длительностью  $t$  представлен на рис. 1.

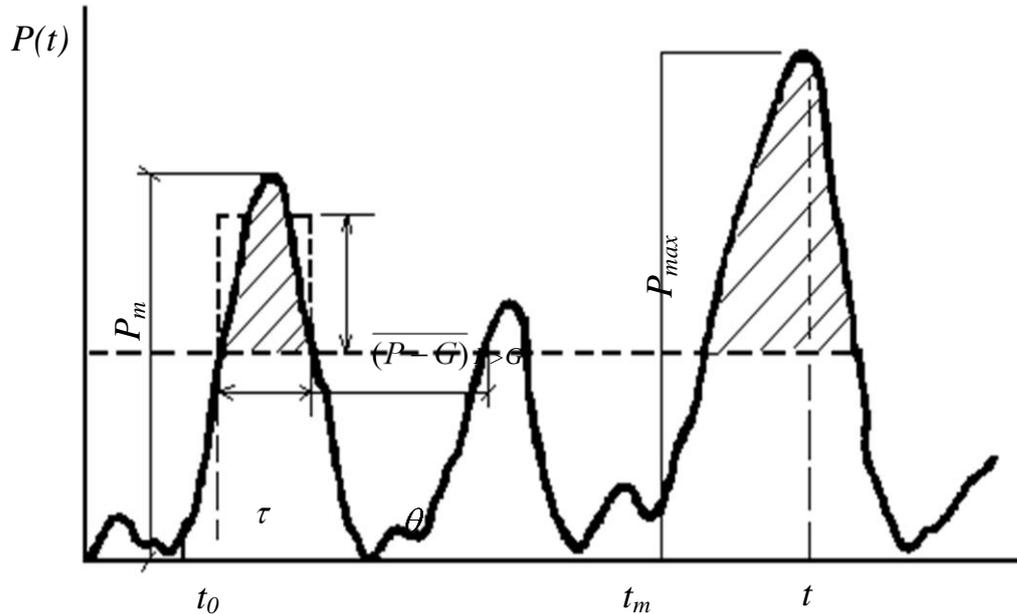


Рис.1 Пересечение траекторией случайного процесса  $P(t)$  критического уровня  $G$  [2]  
 Fig. 1 The intersection of the trajectory of a random process  $P(t)$  of the critical level  $G$  [2]

Статистические характеристики выбросов мгновенной подъемной силы за критический уровень определяется следующими характеристиками:

средняя высота выбросов за уровень  $G$

$$(\overline{P-G}) = S(G)/t(G) = \int_G^\infty (P-G)\psi(P)dP / \int_G^\infty \psi(P)dP \quad (10)$$

средняя частота выбросов

$$\nu(G) = N(G)/T = \int_0^\infty P\psi_2(G, P)dP \quad (11)$$

средняя длительность выбросов

$$\tau(G) = t(G)/N(G) = \int_0^\infty \psi(P)dP / \int_0^\infty P\psi_2(G, P)dP \quad (12)$$

площадь, ограниченная траекторией в пределах одного выброса

$$s(G) = S(G)/N(G) = (\overline{P-G})\tau(G) \quad (13)$$

средняя длительность пребывания случайной функции выше заданного уровня  $G$  в течении времени

$$t(G) = T \int_G^{\infty} \psi(P) dP \quad (14)$$

математическое ожидание площади, ограниченной траекторией случайной функции  $P(t) > G$  в течении времени  $T$  и заданным уровнем  $G$

$$S(G) = T \int_G^{\infty} (P - G) \psi(P) dP \quad (15)$$

среднее число положительных выбросов  $P(t)$  в течении времени  $T$

$$N(G) = T \int_0^{\infty} P \psi_2(G, P) dP \quad (16)$$

На основе методов теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов установлено состояние движения донных наносов в потоке, которое может определяться условиями [9, 10, 11]:

$$1.0 \leq u_{\Delta} / V_{\Delta n, \text{дон}} < 1.8 / \varphi, \quad (17)$$

$$\text{Вер.}(u(t) \geq u_{\Delta n}) = 0,001 u_{\Delta \text{max}} > u_{\Delta n}, \quad (18)$$

$$\frac{\bar{u}_{\Delta}}{V_{\Delta n, \text{дон}}} \geq 0,71, \quad (19)$$

где  $\varphi$  - параметр турбулентности поведения твердых частиц в воде,  $w$  - гидравлическая крупность частиц,  $V_{\Delta n, \text{дон}}$  - допускаемая неразмывающая скорость,  $u_{\Delta n}$  - актуальная неподвижная скорость.

Теоретическая зависимость для определения предельного расхода неоднородных по крупности наносов имеет вид [1, 2]:

$$q_T = \rho_s \frac{\pi d^3}{6} \mu V, \quad (20)$$

где  $\pi d^3/6$  – объем твердой частицы,  $m^3$ ,  $\mu_N$  – мутность потока,  $V = l/t$  – осредненная скорость транспортируемых частиц наносов;  $l$  и  $t$  – средние значения длины и длительности скачков.

Мутность потока  $\mu$  определяем по формуле:

$$\mu = A \frac{g^3}{gH\omega} \quad (21)$$

где  $g$  - средняя скорость потока,  $H$  – средняя глубина потока,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\omega$  - средняя гидравлическая крупность,  $A$  – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Для удельного расхода наносов формулу (12) преобразуют к виду [12]:

$$q_s = \frac{\rho_n \mu Q}{B} = A \frac{\rho_n v^3 Q}{gH\omega B} = A \frac{\rho_n v^4}{g \omega}, \quad (22)$$

где  $Q$  – расход воды в русле,  $B$  – ширина потока,  $\rho_n$  – плотность наносов.

Величина  $A$  зависит от коэффициента Шези:

$$A = \frac{\kappa g}{a C^2} = \frac{\kappa g n^2}{a H^{1/3}}, \quad (23)$$

где  $a = \frac{\rho_n - \rho}{\rho}$  - относительная плотность наносов;  $B$  – ширина потока;  $\rho$  – плотность воды;  $\kappa$  –

безразмерный постоянный коэффициент пропорциональности между затратами энергии на поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии и энергией того же потока без наносов;  $n$  – коэффициент шероховатости.

После соответствующих постановок и преобразований формула (11) для определения предельного удельного расхода наносов может быть представлена в виде:

$$q_{дон} = \rho_{отл} d^2 \eta_c \tau_c \nu_c / t_{\Delta}, \quad (24)$$

где  $\rho_{отл} = \beta \rho_s$  – плотность русловых отложений, кг/м<sup>3</sup>,  $\eta_c$  – вероятность срыва частиц грунта,  $\tau_c$  – средняя длительность срывающих выбросов донной скорости,  $\nu_c$  – средняя частота срывающих турбулентных возмущений.

Величины  $\eta_c$ ,  $\tau_c$  и  $\nu_c$  определяются выражениями:

$$\eta_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} f(x_2) & \text{при } \bar{u}_{\Delta} < u_{\Delta c} \\ 1 & \text{при } \bar{u}_{\Delta} \geq u_{\Delta c} \end{cases}, \quad (25)$$

$$\tau_c = \frac{1 - \Phi(x_1)}{\sqrt{2\pi} \bar{v}_u f(x_1)}, \quad (26)$$

$$\nu_c = \begin{cases} \sqrt{2\pi} \bar{v}_u f(x_1) & \text{при } \bar{u}_{\Delta} < u_{\Delta n} \\ \bar{v}_u & \text{при } \bar{u}_{\Delta} \geq u_{\Delta n} \end{cases}; \quad (27)$$

При определении расхода руслоформирующих наносов учитываем движение наносов по грядам [13-15].

Рассчитываем высоту, длину и скорость перемещения гряд:

- высота гряды

$$h_z = 2.1 \frac{d}{Fr^{4.1}} \left( \frac{v - v_0}{v_0} \right)^{1.4}, \quad (28)$$

- длина гряды

$$\ell_z = H \sqrt[3]{\frac{c^2}{g}}, \quad (29)$$

- скорость гряды

$$c_{\Delta} = 950 \frac{h_z}{\Delta} \nu Fr^3 \quad (30)$$

где  $\Delta$  – высота мезоформы, м.

Для расчета предельного расхода неоднородных по крупности руслоформирующих наносов в турбулентном потоке, получаем следующую зависимость:

$$q_T = \frac{q_{дон} \rho_{отл} \mu Q}{B}. \quad (31)$$

Сопоставление результатов расчета расхода наносов, рассчитанных по формуле (22), с экспериментальными и натурными данными других исследователей представлены на рис. 2 и 3.

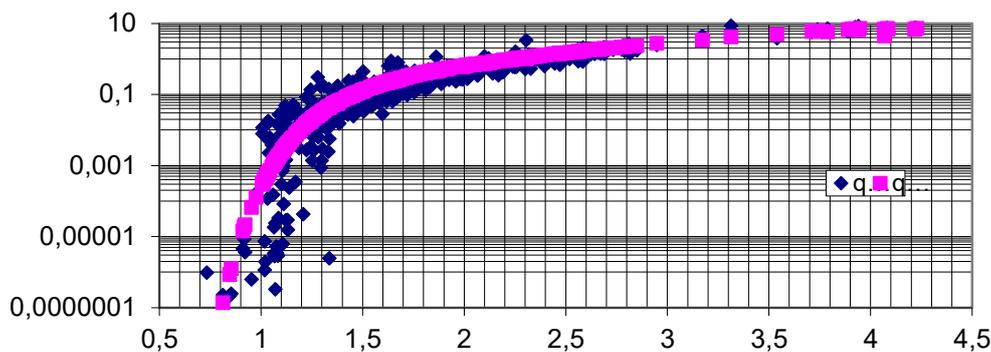


Рис. 2. Апробация модели движения руслоформирующих наносов на натуральных данных

Fig. 2. Testing the model of the movement of channel-forming sediments on field data

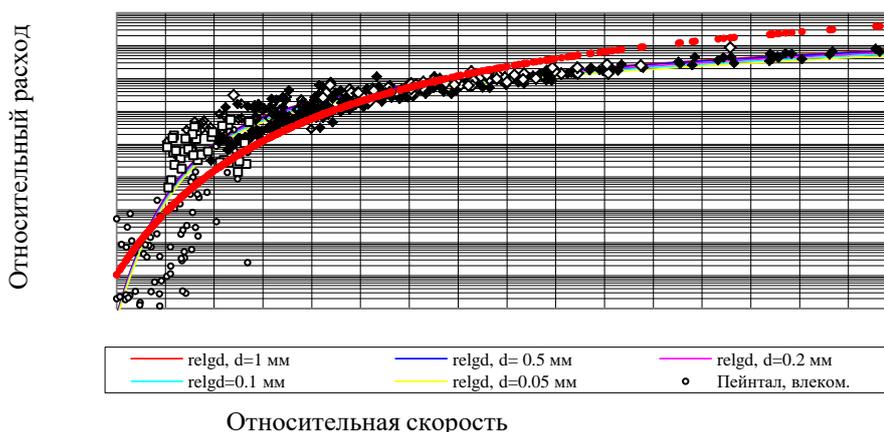


Рис. 3. Сопоставление кривой относительного расхода наносов с экспериментальными данными различных авторов

Fig. 3. Comparison of the curve of relative flow sediment with experimental data of various authors

**Обсуждение результатов.** Представление о преобладающей роли крупномасштабных турбулентных возмущений в процессах транспорта наносов позволяет подойти к анализу механизма движения твердых частиц на основе рассмотрения осредненных характеристик взаимодействия турбулентных образований с переносимыми ими частицами грунта. С этой целью низкочастотные скорости жидкости  $u(t)$  и  $v(t)$ , определяющие величину гидродинамических сил, статистически осредняются по некоторым областям крупномасштабных турбулентных образований, в пределах которых происходит срыв, взвешивание и транспорт наносов. Такое осреднение осуществляется с помощью математических методов теории выбросов случайных процессов, с использованием вероятностных критериев срыва и взвешивания частиц наносов в турбулентном потоке [2].

Анализ математических моделей движения твердых частиц в водном потоке показал, что физической природе транспорта руслоформирующих наносов в большей степени соответствует модель, основанная на учете параметров траекторий твердых частиц, а именно, длин, высот и времени переноса (скачков) придонных и взвешенных наносов и их концентрации в потоке. Такая модель реализуется путем интегрирования осредненных уравнений и вихревых образований, с использованием математического аппарата. В результате получены осредненные статистические характеристики траекторий частиц донных и взвешенных наносов: высота подъема над дном  $h_{дон}$  и  $h_{взв}$ , длительность переноса  $t_{дон}$  и  $t_{взв}$ , дальность переноса  $l_{дон}$  и  $l_{взв}$ , которые зависят от вероятностных параметров срывающих и взвешивающих турбулентных возмущений,

осуществляющих срыв, взвешивание и транспорт наносов: частоты и длительности воздействия возмущений на твердые частицы [10].

В результате многолетних теоретических и экспериментальных исследований физических процессов взаимодействия турбулентного водного потока с руслоформирующими наносами, на основе представлений о стохастическом характере этого взаимодействия и использования математических методов гидромеханики, механики грунтов, теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, разработаны основы математического моделирования процессов движения твердых частиц в естественных речных руслах, сложенных неоднородными по крупности несвязными грунтами.

**Вывод.** Выполненное сопоставление опытных и теоретических значений расхода руслоформирующих наносов показывает, что в диапазоне гидравлических условий и размеров частиц, охваченных рассматриваемыми опытами, полученные формулы движения руслоформирующих наносов, принимая во внимание чрезвычайную сложность явления, дают в основном удовлетворительные результаты.

Имеющиеся отклонения расчетных и опытных значений могут быть объяснены неточностью определения некоторых исходных параметров, в частности, использованием при определении параметров траекторий взвешенных наносов в весьма приближенной эмпирической зависимости для определения средней частоты пульсаций лагранжевой вертикальной скорости.

#### **Библиографический список:**

1. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.25-37.
2. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – С.53-68.
3. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
4. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181.
5. Копалиани З.Д., Костюченко А.А. Расчеты расхода донных наносов в реках: сборник работ по гидрологии. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – № 27. – С. 25–40.
6. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp.251-258.
7. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
8. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, vol.129, no.2, pp.120-128.
9. Магомедова А.В., Магомедова М.Р. О факторах, обуславливающих процесс транспорта руслоформирующих наносов //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. Т.29. №2. С.58-64.
10. Григорьян О.П., Магомедова М.Р. Имитационное математическое моделирование распространения взвешенных частиц для определения зон повышенной мутности при оценке ущерба водным биологическим ресурсам реки Черек //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т.42, №3 С.106-109.
11. Магомедова М.Р. Практическое применение авторской модели транспорта минеральных частиц //Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т.37, №2. С.84-91.
12. Базилевич В.А., Козицкий В.В. К вопросу определения расхода руслоформирующих взвешенных наносов в речных потоках // Гидромеханика. 1987. №10, с.61-63.
13. Барышников Н.Б., Пагин А.О. Гидравлическое сопротивление речных русел// Журнал университета водных коммуникаций. – СПб, т.2 , 2010. С.90-93.
14. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеиздат, 1985. С.127-130.
15. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp.662-673.

#### **References:**

1. Magomedova A.V. Eroziionnyye protsessy v ruslakh rek i kanalov. – М.: VZPI, 1990. – S.25-37. [Magomedova A.V. Erosion processes in riverbeds and canals. - М .: VZPI, 1990. S.25-37. (In Russ.)]

2. Magomedova M.R. Matematicheskoye modelirovaniye dvizheniya pridonnykh nanosov v otkrytykh ruslakh: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014. – S.53-68. [Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov MA, 2014. pp.53-68. (In Russ.)]
3. Alekseyevskiy N.I. Transport vlekomykh nanosov pri razvitoy strukture ruslovogo rel'yefa // Meteo-rologiya i gidrologiya. 1990. № 9, s. 100-105. [Alekseevsky N.I. Transport of sediment load with the developed structure of the channel relief // Meteorology and hydrology. 1990. No. 9, pp. 100-105. (In Russ.)]
4. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181. [Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10-th Inter Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007, vol. 3, pp. 175–181. (In Russ.)]
5. Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Raschety raskhoda donnykh nanosov v rekakh: sbornik rabot po gidrologii. – SPb.: Gidrometeoizdat, 2004. – № 27. – S. 25–40. [Kopaliani Z.D., Kostyuchenko A.A. Calculations of sediment discharge in rivers: a collection of works on hydrology. - St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2004. No. 27. pp. 25–40. (In Russ.)]
6. Benoit C., Magnus L. A. General formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2005, pp. 251-258.
7. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Eksperimental'nyye issledovaniya i gidravlicheskiye modelirovaniye rechnykh potokov i ruslovogo protsessa. – SPb.: Nestor-Istoriya, 2011. – S. 103–107. [Klavin A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. - St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. S. 103–107. (In Russ.)]
8. Wilcock P.R., Crowe J.C. Surface-based transport model for mixed-size sediment. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, vol. 129, no.2, pp. 120-128.
9. Magomedova A.V., Magomedova M.R. O faktorakh, obuslovlivayushchikh protsess transporta rusloformiruyushchikh nanosov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki – 2013. – T.29. – №2– S.58-64. [Magomedova A.V., Magomedova M.R. On the factors determining the transport process of channel-forming sediment // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences, 2013. Vol.29. No. 2 pp.58-64. (In Russ.)]
10. Grigor'yan O.P., Magomedova M.R. Imitatsionnoye matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya vzveshennykh chastits dlya opredeleniya zon povyshennoy mutnosti pri otsenke ushcherba vodnym biologicheskim resursam reki Cherek // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki – 2016. –T.42, - №3 - S.106-109. [Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the distribution of suspended particles to determine areas of high turbidity in assessing damage to the aquatic biological resources of the Cherek River // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016. Vol.42, No. 3 - S.106-109. (In Russ.)]
11. Magomedova M.R. Prakticheskoye primeneniye avtorskoy modeli transporta mineral'nykh chastits // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki 2015. T.37, №2 S.84-91. [Magomedova M.R. The practical application of the author's model of transport of mineral particles // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2015. Vol.37, No. 2 pp. 84-91. (In Russ.)]
12. Bazilevich V.A., Kozitskiy V.V. K voprosu opredeleniya raskhoda rusloformiruyushchikh vzveshennykh nanosov v rechnykh potokakh // Gidromekhanika. 1987. №10, s.61-63. [Bazilevich V.A., Kozitskiy V.V. On the issue of determining the flow rate of channel-forming suspended nanosov in river flows // Hydromechanics. 1987. No. 10, pp. 61-63. (In Russ.)]
13. Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Gidravlicheskiye soprotivleniye rechnykh rusel // Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy. – SPb, t.2, 2010. – S.90-93. [Baryshnikov N.B., Pagin A.O. Hydraulic resistance of river channels // Journal of the University of Water Communications. -SPb, t.2, 2010. pp.90-93. (In Russ.)]
14. Rzhantsyn N.A. Rusloformiruyushchiye protsessy rek. – L.: Gidrometeoizdat, 1985. – S.127-130. [Rzhantsyn N.A. River-forming processes of rivers. - L.: Gidrometeoizdat, 1985. pp.127-130. (In Russ.)]
15. Brian W. D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. The Journal of Geology, 2011, vol. 106, no. 6, pp. 662-673.

**Сведения об авторе:**

**Магомедова Милада Руслановна** – кандидат технических наук, декан факультета нефти, газа и природообустройства.

**Information about author:**

**Milada R. Magomedova** – Cand. Sci. (Technical), Dean of the Faculty of Oil, Gas and Environmental Engineering.

**Конфликт интересов.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.03.2019.

Принята в печать 21.05.2019.

**Conflict of interest.**

The author declare no conflict of interest.

Received 17.03.2019.

Accepted for publication 21.05.2019.