

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS**

**УДК 556.536:631.4**

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-58-66

Оригинальная статья /Original Paper

**Моделирование общего размыва неоднородных по крупности  
несвязных грунтов в руслах рек**

**М.Р. Магомедова, Р.А. Курбанов**

Дагестанский государственный технический университет,  
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка модели размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. **Методы.** Математическая модель разработана с использованием теории вероятностей и теории выбросов случайных процессов, с учетом нормального закона распределения горизонтальной и вертикальной составляющих мгновенных скоростей течения и Релеевского закона для распределения их максимумов. **Результат.** Выполнен статистический анализ различных моделей размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. **Вывод.** Основные принципы исследования различных моделей размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек, а также структура, составленных на ее основе алгоритмов расчета и программ позволяют непрерывно совершенствовать методику расчета и вносить коррективы в соответствующие модули алгоритмов и программ.

**Ключевые слова:** диаметр частиц, удельный расход воды, мутность потока, моделирование, гранулометрический состав, скорость течения, расход наносов, турбулентный поток, регрессионная модель

**Для цитирования:** М.Р. Магомедова, Р.А. Курбанов. Моделирование общего размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов в руслах рек. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):58-66 DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-58-66

**Modeling of general erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds**

**M.R. Magomedova, R.A. Kurbanov**

Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop a model for the erosion of non-cohesive soils that are heterogeneous in size in river beds. **Method.** The mathematical model was developed using the theory of probability and the theory of outbursts of random processes, taking into account the normal law of distribution of the horizontal and vertical components of the instantaneous flow velocities and the Rayleigh law for the distribution of their maxima. **Result.** Statistical analysis of various models of erosion of non-cohesive soils heterogeneous in size in river channels was performed. **Conclusion.** The basic principles of studying various models of erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds, as well as the structure of calculation algorithms and programs compiled on its basis, allow us to continuously improve the calculation method and make adjustments to the corresponding modules of algorithms and programs.

**Keywords:** particle diameter, specific water consumption, flow turbidity, modeling, particle size distribution, flow velocity, sediment flow, turbulent flow, regression model

**For citation:** M.R. Magomedova, R.A. Kurbanov. Modeling of general erosion of heterogeneous non-cohesive soils in river beds. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 58-66. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-58-66

**Введение.** Вопрос о транспортирующей способности русловых потоков, несмотря на многолетнюю историю, остается одной из актуальных задач динамики русловых потоков, так

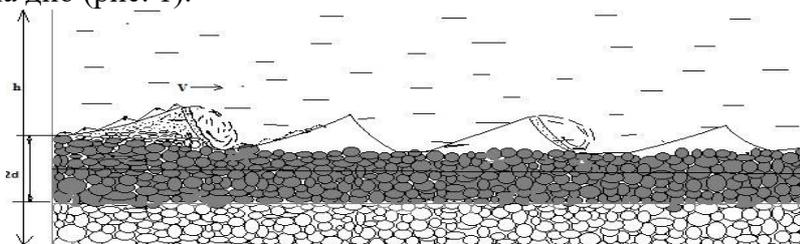
как от ее решения зависит достоверность большинства инженерных прогнозов по деформации русел. Процессы размыва связных и несвязных грунтов наименее изучены в динамике русловых потоков. Это объясняется сложностью и изменчивостью физико-химической природы грунтов и трудностью постановки экспериментов, теоретического рассмотрения, особенно связных грунтов. Многочисленные исследования указанной проблемы чаще всего охватывали один из видов движения наносов или же ставили целью создание обобщенных уравнений транспорта, охватывающих все руслоформирующие донные и взвешенные наносы [1].

Ранее разработка методов расчета расхода руслоформирующих наносов в основном велась по следующим направлениям [2-8]:

- установление связи между расходом донных наносов и избытком влекущей силы, или касательного напряжения на дне потока;
- применение энергетического подхода к проблеме транспорта наносов, согласно которому расход наносов рассматривается как функция мощности, развиваемой потоком на единице площади дна и равной произведению влекущей силы на донную скорость потока;
- представление о пропорциональности твердого расхода скорости перемещения наносов и их концентрации в потоке;
- применение понятий и математических методов теории вероятностей и теории случайных процессов, позволяющих более полно описать стохастический характер процессов взаимодействия потока с частицами грунта.

**Постановка задачи.** Степень достоверности расчета расхода наносов и неразмывающих скоростей зависит от степени соответствия используемых математических моделей процесса размыва действительной физической природе явления, а также от полноты учета влияющих на эти процессы факторов.

Одной из основных задач изучения устойчивости русел рек является разработка рациональных методов установления допустимых неразмывающих скоростей водного потока. При достаточной мощности потока частицы грунта, формирующие дно русла, приходят в движение и уносятся, дно размывается, а при недостаточной мощности потока взвешенные частицы выпадают из взвеси на дно (рис. 1).



**Рис. 1. Поверхностный слой частиц несвязного грунта**  
**Fig. 1. Surface layer of non-cohesive soil particles**

На переднюю грань частицы, расположенной на дне, поток оказывает положительное давление, а на тыловой создается вакуум. Так как абсолютное давление на переднюю грань больше, чем на тыловую, то среднее давление на нижнюю грань положительное. Кроме того, частицы могут оказаться под воздействием вихрей, возникающих в придонном слое потока, что также вызывает появление вертикально направленных импульсов. Это вихревое движение, обусловленное разностью скоростей в пограничном слое – основная причина размыва русла [1].

Сила, с которой водный поток воздействует на частицу на дне водотока, подвержена мгновенным изменениям из-за турбулентного характера движения. Природа турбулентного потока столь сложна, что, несмотря на ряд ценных работ ученых, нет полной ясности в вопросах о характере закономерностей пульсации. По современному представлению о процессе размыва несвязных грунтов, трогание частиц происходит при случайной совокупности различных факторов. Поэтому, учитывая случайный характер факторов, вызывающих процесс размыва, целесообразно для описания его применять методы математической статистики.

Под воздействием водного потока в результате вымыва мелких фракций на поверхности русла образуется естественная отмостка из крупных частиц, которая служит своеобразным защитным слоем, предотвращающим дальнейший размыв грунта. Наличие отмостки повышает сопротивляемость грунта размыву и поэтому позволяет в большинстве случаев назначать допускаемые неразмывающие скорости для этих грунтов, значительно превышающие допускаемые скорости для однородных грунтов с таким же средневзвешенным диаметром частиц.

Главными факторами, определяющими интенсивность процесса естественной отмостки являются: гранулометрический состав грунта и влияние на его изменение в процессе размыва гидравлических условий в потоке. Именно гидравлические условия предопределяют размеры отмасивающих фракций, а уже доля этих фракций в исходном грунте определяется видом гранулометрической кривой. Окончательный состав отмостки, образующийся на поверхности грунта, существенным образом зависит от глубины размыва (толщины слоя, переработанного потоком грунта). Доля крупных частиц, а следовательно, средний диаметр частиц поверхностного слоя увеличивается с увеличением глубины размыва. Глубина же размыва регулируется степенью укрупнения поверхностного слоя.

Таким образом, явление естественной отмостки русла представляет собой сложный процесс, в котором все элементы (гидравлические условия, размер отмасивающих фракций, степень укрупнения поверхностного слоя, глубина размыва) взаимосвязаны и не учет этих связей, естественно, приводит к значительным погрешностям [2, 6].

Вследствие чрезвычайного разнообразия форм, размеров, характера расположения частиц друг относительно друга все характеристики поверхностного слоя носят статистический характер; поэтому целесообразно применение для их определения методов теории вероятностей [2].

Существующие математические модели общего размыва речных русел базируются в основном на упрощенных гидравлических уравнениях (уравнения Шези, Сен-Венана), при этом для расчета размывающей и транспортирующей способности потока используются уравнения и формулы, разработанные для равномерного движения, и как правило, не обеспечивающие полного учета основных факторов взаимодействия потока и русла: статистических характеристик турбулентности потока, неоднородности гранулометрического состава руслоформирующих грунтов и наносов, изменчивости видов и состава грунтов по длине, ширине русла и глубине залегания и др [2].

Надежный прогноз общего размыва речных русел может быть осуществлен на основе реализуемых достоверных математических моделей процесса размыва речных русел быстро изменяющимся течением [3-5].

Разработка такой модели должна включать: моделирование неустановившегося движения воды в естественных речных руслах со сложной морфологией; моделирование процесса размыва неустановившимся потоком грунтов различного вида и состава; моделирование нестационарного процесса транспорта донных и взвешенных наносов.

**Методы исследования.** Расчет предельного размыва в заданном створе при сохранении постоянного уровня свободной поверхности производится исходя из уравнения стабилизации размыва [2].

Прекращение размыва происходит при выполнении равенства фактической и неразмывающей скорости потока и предельная деформация русла находится в результате численного решения следующих уравнений:

$$V = V_{H.доп}, \quad (1)$$

$$q = Vh = const, \quad (2)$$

где  $q$  – удельный расход воды,  $m^3/cm$ ;  $h$  – глубина потока,  $m$ ;  $V_{H.доп}$  – неразмывающая скорость потока, для несвязных грунтов определяемая по формуле:

$$V_{\Delta H.доп} = \left( \lg \frac{8.8}{d} \right) \sqrt{\frac{2m_1}{0,44\rho n_p} [g(\rho_z - \rho)D_{отм}]}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр частиц грунта, м;  $\rho_s$  и  $\rho$  – плотность материала частиц грунта и воды, кг/м<sup>3</sup>,  $D_{омм}$  – средний диаметр частиц отмытки, м  $m_1$ ,  $n_p$ ,  $k_1$  – соответственно коэффициенты условий работы русла, перегрузки и однородности сил сцепления.

Коэффициент перегрузки для частиц  $d < 1$  мм определяем по эмпирической формуле:

$$n_p = 1 + \frac{1}{0,3 + [v^2 / (gd^3)]^{1/3}}, \quad (4)$$

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

$$D_{омм} = d_{cp} + \int_0^{h_p} \delta h \int_{dh}^{d_{max}} \varphi_0(d) (1 - d_{cp} / d) \delta d \quad (5)$$

где  $d_{cp}$  и  $d_{max}$  – соответственно, средневзвешенный и максимальный диаметры частиц исходного грунта.

Алгоритм расчета допустимой неразмывающей донной скорости реализован в подпрограмме Velocity [7-8]. Расчет допустимой неразмывающей донной скорости, как для однородных, так и для неоднородных по крупности грунтов выполняется по формуле (3) в соответствии с признаком счета NEOD: если NEOD = 0 – однородный по крупности грунт, если NEOD = 1 – неоднородный по крупности грунт.

1. Определение коэффициента перегрузки: если  $d < 1$  мм, то расчет осуществляем по формуле (4); для частиц  $d \geq 1$  мм  $n_p = 4$ .

2. Проверяется условие: если NEOD = 0, то расчет допустимой неразмывающей донной скорости осуществляется по среднему диаметру частиц  $d_{cp}$ , если NEOD = 1 – с учетом гранулометрического состава грунта.

3. Расчет максимального диаметра подвижных фракций русловых отложений,  $d_{km}$  выполняется на основе формулы (3) при равенстве фактической  $\bar{u}_\Delta$  и неразмывающей скорости  $V_{\Delta доп}$ .

4. Определение относительного содержания подвижных фракций и их средний диаметр  $d_D$  осуществляется с помощью подпрограммы линейной интерполяции по массивам, характеризующим гранулометрический состав в подпрограмме Granul.

5. Конец расчета.

Специфической особенностью процесса размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов является изменение в процессе размыва гранулометрического состава поверхностного слоя грунта. Для расчета параметров вычисляются следующие величины при изменении  $i$  от 1 до  $n$ , где  $n$  – количество фракций в грунте:

1. Средний диаметр фракции

$$d_{фр,i} = \frac{d_{min,i} + d_{max,i}}{2};$$

2. Ординаты интегральной гранулометрической кривой

$$P_i = \sum_{i=1}^i P_{фр,i},$$

изменяющиеся в пределах  $0 < P_i < 1$ ;

3. Средневзвешенный диаметр частиц грунта

$$d_{cp} = \sum_{i=1}^n P_{fp,i} d_{fp,i}.$$

Данный алгоритм реализован в подпрограмме Granul.

Далее расчет производим по отдельным участкам, предварительно определив распределение удельных расходов воды по ширине потока.

Расчет распределения удельных расходов воды построен на применении основного уравнения равномерного движения к отдельным участкам шириной  $\Delta B_k$  и глубиной  $h_k$  (рис. 2):

$$Q_k = S_k \sqrt{J} \quad (6)$$

где  $Q_k$  – расход на  $k$ -м участке,  $m^3/c$ ,  $J$  – гидравлический уклон,  $S_k$  – модуль расхода элементарной расчетной струи,  $m^3/c$ .

$$S_k = \Delta B_k h_k C_k \sqrt{h_k} \quad (7)$$

$C_k$  – коэффициент Шези, вычисляемый по формуле Г.В. Железнякова

$$C_k = 0.5 \left[ \frac{1}{n_\omega} - \frac{\sqrt{g}(1-lgh_k)}{0.13} \right] + \sqrt{0.25 \left[ \frac{1}{n_\omega} - \frac{\sqrt{g}(1-lgh_k)}{0.13} \right]^2 + \frac{\sqrt{g} \left( \frac{1}{n_\omega} + \sqrt{g} lgh_k \right)}{0.13}} \quad (8)$$

где  $h_k$  – глубина потока на  $k$ -м участке, м;  $n_\omega$  – коэффициент шероховатости, устанавливаемый по существующим нормативным документам (СНиП 2.06.03-85) или в результате расчета по гидравлическим параметрам потока в бытовом состоянии.

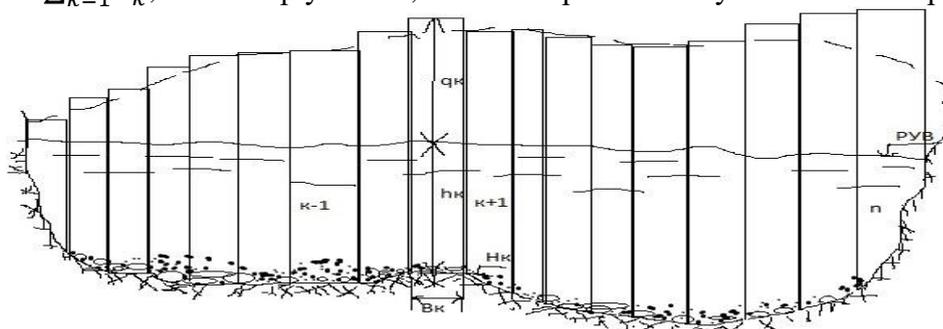
$$h_k = PVB - H_k \quad (9)$$

Удельный расход воды находят с учетом соотношения между расходом соответствующей струи и расходом всего потока:

$$\frac{Q_k}{Q} = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^n S_k}, \quad (10)$$

$$q_k = \frac{Q_k}{\Delta B_k} = \frac{Q S_k}{\Delta B_k S_1} \quad (11)$$

где  $S_1 = \sum_{k=1}^n S_k$ ;  $k$  – номер участка;  $n$  – число расчетных участков по ширине потока.



**Рис. 2. Распределение удельных расходов воды и глубины размыва по ширине потока**  
**Fig. 2. Distribution of specific water flow rates and erosion depth according to the width of the stream**

Численный метод решения системы уравнений предельного размыва русла зависит от вида грунта, где для однородных грунтов (связных и несвязных) используется метод итераций, применительно к уравнению:

$$h_k = q_k / V_{H^* \text{ доп}}, \quad (12)$$

где  $V_{H^* \text{ доп}} = \varphi(h_k)$ . Расчет производится с точностью 0.00...0.01  $h_k$

Отметки размывого дна вычисляют по формуле:

$$H_k = PVB - h_k \quad (13)$$

В случае неоднородного по крупности несвязного грунта применяются два численных метода для решения системы уравнений предельного размыва.

Методом простых итераций определяют отметку дна русла, с которой начинается процесс естественной отмытки русла крупными фракциями грунта.

Этому соответствует неравенство  $V_k < V_H$ ,  $V_H$  – неразмывающая скорость для частиц максимальной крупности, присутствующих в грунте, с учетом влияния неоднородности грунта на высоту выступов шероховатости:

$$V_H(d_{gg}) = \left(\frac{lg8.8h_k}{d_{95}}\right) \sqrt{\frac{2m_1}{0.44\rho n_1} g(\rho_r - \rho)d_{99}} \quad (14)$$

Расчет ведут по уравнению:

$$h_k = q_k/V_H(d_{gg}) \quad (15)$$

Так как на практике неоднородные грунты состоят из целой гаммы разнообразных по крупности частиц и поэтому заранее нельзя сказать, какие частицы войдут в состав отмытки, то расчет рекомендуется производить несколько раз, принимая в качестве расчетных фракций отмытки ряд значений крупных фракций в данной смеси по порядку.

Для расчета размыва русла при условии  $V_k < V_H$  используется разностный метод, вследствие интегрального вида соотношения для среднего диаметра отмытки.

Для этого вводится сетка значений глубины потока с переменным шагом  $0.01 \dots 0.001 h_{kj}$ . На указанной сетке последовательно вычисляются значения фактической скорости потока по формуле:

$$V_{kj} = q_k/h_{kj} \quad (16)$$

Отметки дна размываемого русла вычисляют по формуле:

$$H_{k,j+1} = H_{kj} - \Delta h_{kj} \quad (17)$$

На каждом шаге расчета производится сравнение фактической скорости потока с неразмывающей.

Расчет прекращается при наступлении неравенства  $V_k < V_{H\text{доп.}}$

В соответствии с методикой разработан алгоритм расчета общего размыва русел при неустановившемся течении.

**Обсуждение результатов.** Выполнена статистическая обработка натуральных и экспериментальных данных различных исследователей (В.Н. Гончарова, Г. Джильберта, А.М. Мухамедова, А.С. Пейнтела, В.Ф. Талмазы, И.В. Егиазарова, К.И. Россинского, И.И. Леви, В.С. Кнорова) по транспорту влекомых, полувзвешенных и взвешенных наносов.

По экспериментальным данным (714 значений), охватывающие большой диапазон крупности наносов ( $d = 0,1 \dots 83$  мм) и скоростей течения ( $V = 0,01 \dots 3$  м/с), отобранные согласно соответствующим критериям, построена точечная диаграмма в виде зависимости между удельными показателями расхода наносов и скорости, первый из которых изменяется в диапазоне  $10^7 \dots 10^2$ , а второй – в диапазоне  $1 \dots 4$ .

Для выбора регрессионной модели выполнялся визуальный анализ этой зависимости и сопоставление с различными регрессионными моделями.

При построении линии регрессии, исследованы пять моделей, которые при визуальной оценке лучше описывают экспериментальную зависимость: линейная модель, логарифмическая, экспоненциальная, гиперболическая (рис.3-6).

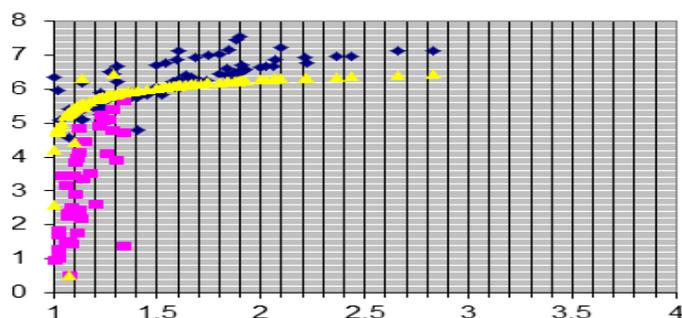


Рис. 3. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (логарифмическая модель)

Fig. 3. Comparison with experimental and field data of calculated values (logarithmic model)

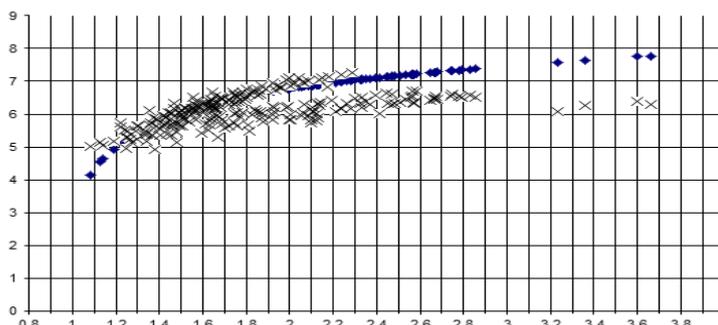


Рис. 4. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (линейная модель)

Fig. 4. Comparison with experimental and field data of calculated values (linear model)

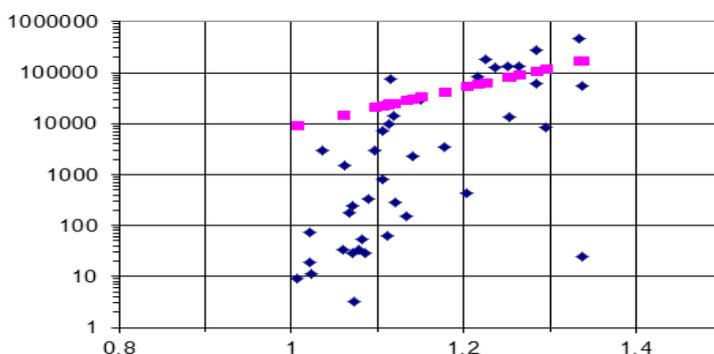


Рис. 5. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (гиперболическая модель)

Fig. 5. Comparison with experimental and field data of calculated values (hyperbolic model)

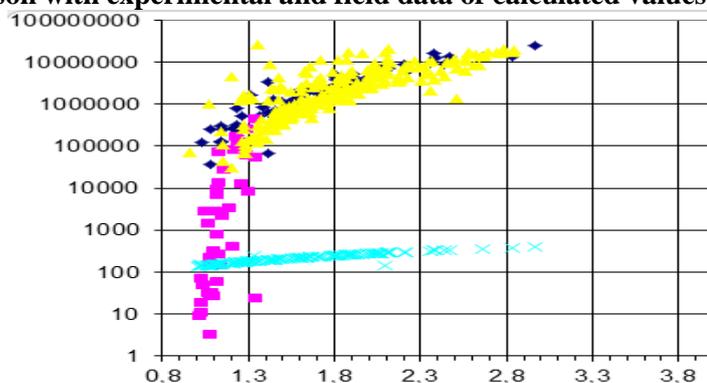


Рис. 6. Сопоставление с экспериментальными и натурными данными расчетных значений (экспоненциальная модель)

Fig. 6. Comparison with experimental and field data of calculated values (exponential model)

Таким образом, регрессионный анализ показал, что формула зависимости расхода наносов для всего исследованного диапазона должна иметь составной характер.

Сопоставление с экспериментальными данными расчетных значений расхода наносов в исследованном диапазоне параметров потока и грунта дало удовлетворительные результаты на определенном диапазоне расходов и скоростей.

Выполненный регрессионный анализ показал, что все использованные модели во всем исследованном диапазоне дают большую погрешность  $S = 13.4$ . В связи с большим диапазоном изменения крупности наносов и скоростей течения удовлетворительное соответствие экспериментальным данным некоторых моделей имеет место только в одном из диапазонов относительных скоростей  $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1...1,3$  и  $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1,2...3,2$ . Наименьшее отклонение от экспериментальных данных дают гиперболическая модель 1 в диапазоне  $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1,2...3,2$  и степенная модель в диапазоне  $\bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} = 1...1,3$  (табл. 1).

**Таблица 1. Ошибки, полученные для различных моделей при сравнении экспериментальных данных с расчетными**  
**Table 1. Errors obtained for various models when comparing experimental data with calculated ones**

Регрессионные модели Regression Models	Среднеквадратическая погрешность, $\delta$ RMS error	Сумма квадратов отклонений, S Sum of squared deviations
$1 \leq \bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} < 1.3$		
Степенная Power	0,000000789	0,000007
Линейная Linear	0,000000327	0,000007
Гиперболическая Hyperbolic	0,000000027	0,000001
Логарифмическая Logarithmic	0,000000327	0,000007
$1.2 \leq \bar{U}\Delta/V\Delta_{дон} < 3.2$		
Гиперболическая Hyperbolic	0,000000023	0,0000101
Гиперболическая 2 Hyperbolic 2	0,072	31,122
Экспоненциальная Exponential	0,021	6,723

**Вывод.** Разработка надежных методов прогноза размыва неоднородных по крупности несвязных грунтов должна вестись по пути возможно более полного приближения расчетной схемы процесса размыва к его действительной физической сущности. Это отчасти может быть достигнуто в результате учета изменения в процессе размыва гранулометрического состава поверхностного слоя грунта, а также использования в качестве характеристики исходного гранулометрического состава размываемого грунта – закона распределения размеров его частиц, который является наиболее полной характеристикой гранулометрии грунта [9-12].

В зависимости от типа решаемой задачи в исследованных моделях к приведенным уравнениям добавляются то или иное количество уравнений, необходимое для замыкания системы. Такой подход, позволяющий получить решение задач в окончательном виде, применим в тех случаях, когда возможна схематизация живых сечений речного потока в виде однообразного поперечного профиля на большом протяжении, а также при однородном геологическом строении ложа водотока.

Между тем, неоднородность по крупности, являясь характерной особенностью большинства встречающихся на практике несвязных грунтов, оказывает во многих случаях существенное влияние на процесс размыва вследствие возникновения естественной отмытки русла [2, 15]. Поэтому изложенная выше методика учета неоднородности грунта при учете размыва русел, а также транспортирующей способности потока может быть применена при решении задач прогноза общего размыва русел значительной протяженности, сложенных неоднородными по крупности несвязными грунтами.

**Библиографический список:**

1. Мирцхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М., 1967, 180 с.
2. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: ВЗПИ, 1990. – С.88-108.
3. Алексеевский Н.И. Транспорт влекомых наносов при развитой структуре руслового рельефа // Метеорология и гидрология. 1990. № 9, с. 100-105.
4. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers // *Water Recurs.* Moscow, Res. 1977. 13. 2. P. 303-312.
5. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб.: Нестор-История, 2011. – С. 103–107.
6. 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.
7. Магомедова М.Р. Математическое моделирование движения придонных наносов в открытых руслах: Махачкала: Алеф, Овчинников М.А., 2014. – 137 с.
8. 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.
9. Гончаров В.Н. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 453 с.
10. Караушев А.В. Транспорт наносов в открытых потоках // Труды ГГИ. – 1951. – Вып. 28. – С. 78-122.
11. Леви И.И. Динамика русловых потоков. – Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 247 с.
12. Россинский К.И., Дебольский В.К. Речные наносы. М.: Наука.– 1980. – 218 с.
13. 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.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005, pp.251-258.
15. Магомедова М.Р. Расчетная модель движения твердых частиц в придонных турбулентных потоках // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. –Т.46, - №2 - С.98-107.

**References:**

1. Mirtskhulava Ts.E. Erosion of channels and methods for assessing their stability. M., 1967; 180. (In Russ)
2. Magomedova A.V. Erosion processes in the channels of rivers and canals. M.: VZPI, 1990; 88-108. (In Russ)
3. Alekseevskiy N.I. Transport of traction sediments with a developed structure of the channel relief. *Meteorology and Hydrology*. 1990; 9: 100-105. (In Russ)
4. Bagnold R.A. Bed load transport by natural rivers. *Water Recurs.* Moscow, Res. 1977; 13. 2.:303-312.
5. Klaven A.B., Kopaliani Z.D. Experimental studies and hydraulic modeling of river flows and channel process. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011; 103-107. (In Russ)
6. Kopaliani Z.D. Problem of bed load discharge assessment in rivers. Proc. 10th International Symp. on River Sedimentation. Moscow, 2007; 3: 175–181.
7. Magomedova M.R. Mathematical modeling of the movement of bottom sediments in open channels: Makhachkala: Alef, Ovchinnikov M.A., 2014; 137. (In Russ)
8. Grigoryan O.P., Magomedova M.R. Simulation mathematical modeling of the spread of suspended particles to determine areas of increased turbidity in assessing damage to water biological resources of the Cherek River. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences* 2016; 42 (3): 106-109. (In Russ)
9. Goncharov V.N. Fundamentals of channel flow dynamics. L.: *Gidrometeoizdat*, 1954;453. (In Russ)
10. Karaushev A.V. Sediment transport in open streams. *Proceedings of the GGI*. 1951; 28: 78-122. (In Russ)
11. Levi I.I. Dynamics of channel flows. L.: *Gosenergoizdat*, 1957; 247. (In Russ)
12. Rossinsky K.I., Debolsky V.K. River deposits. M.: *Nauka*. 1980; 218. (In Russ)
13. Brian W.D., Peter F.F. Grain Size, Sediment Transport Regime, and Channel Slope in Alluvial Rivers. *The Journal of Geology*, 2011; 106(6):662-673.
14. Benoit C., Magnus L.A General formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005; 251-258.
15. Magomedova M.R. Calculation model of the movement of solid particles in near-bottom turbulent flows. *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46(2):98-107. (In Russ)

**Сведения об авторах:**

Магомедова Милада Руслановна, кандидат технических наук, доцент; n-guseinova@mail.ru

Курбанов Рашид Алибекович, аспирант, старший преподаватель кафедры «Нефтегазовое дело»; kurbanovrd@yandex.ru

**Information about authors:**

Milada R. Magomedova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.; n-guseinova@mail.ru

Rashid A. Kurbanov, Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department "Oil and gas business"; kurbanovrd@yandex.ru

**Конфликт интересов/Conflict of interest.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 29.09.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 30.10.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 30.10.2022.