

М.В. Шмакова

РАСЧЕТ ЗАНОСИМОСТИ РУСЛОВЫХ КАРЬЕРОВ

M.V. Shmakova

CALCULATION OF THE RECORDED CHANNEL PITS

На основании основного уравнения движения воды и твердого вещества в открытых руслах и разности транспортирующего потенциала потока рассматривается новый метод расчета характеристик занесения русловых карьеров. Полученные формулы скорости занесения русловых карьеров были апробированы на данных экспериментов на лотках и показали хорошие результаты.

Ключевые слова: русловые карьеры, математическая модель речного потока, формула расхода наносов.

A new method of calculation is based at the fundamental equation of movement of water and solid and difference of the flow transporting capacity too. Represented the formula of entry channel pits were tested at experiments data and shown good results.

Key words: a pit channel, a formula of sediment discharge, a mathematical model of river flow.

Общие положения

Источниками наносов, осаждаемых в русловом карьере, являются взвешенные и влекомые наносы, а также продукты обрушения склонов карьера, возникающие под действием силы тяжести и давления потока. По оценкам ВСН 163–83 [2] взвешенные наносы в карьере могут составлять до 10 % от общего количества поступившего в карьер твердого вещества. Следует заметить, что в твердое вещество обрушившегося склона руслового карьера также могут включаться и влекомые наносы.

Влекомые и взвешенные наносы попадают в русловой карьер в результате падения транспортирующего потенциала потока, движения и последующего обрушения в карьер русловых форм (гряды, побочни, осередки).

В настоящее время выделяются следующие подходы к количественной оценке скорости занесения русловых карьеров:

1. Натурные методы измерения расхода наносов, перемещающихся в форме гряд, либо измерения фактического объема наносов, отложившихся в траншее [2].

2. Эмпирические расчетные методы, основанные на скорости перемещения донных гряд [2].

3. Методы математического моделирования.

Применение тех или иных методов расчета в первую очередь должно быть обусловлено характером поставленной задачи и наличием соответствующих исходных данных.

Использование математических моделей дает более точный и развернутый результат. Но, в свою очередь, требует задания детальной гидрометрической информации. Определенными недостатками многих математических моделей могут служить используемые в них эмпирические коэффициенты.

Для относительно мобильной оценки, не требующей дополнительных информационных затрат, могут служить методы расчета, основанные на формулах расходов наносов [1]. Однако известные формулы расхода влекомых наносов содержат понижающие точность расчетов эмпирические коэффициенты. И, в первую очередь, эти формулы ориентированы на грядовую форму движения наносов [2]. Поэтому для русловых потоков, в которых отсутствуют грядовая форма перемещения наносов, такие методы расчета не подходят.

Прогноз заносимости русловых карьеров

Основное уравнение математической модели движения воды и твердого вещества в речном потоке имеет вид [4]:

$$(1-f)(mg \left[I - \frac{\partial H}{\partial L} \right] - m \frac{dv}{dt}) - N_{act} m_{ч} \frac{dv_{ч}}{dt} + N_{act} m_{ч} g - cS = 0,$$

где f – коэффициент внутреннего трения, б/р; m – масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон дна; H – глубина потока, м; L – расстояние, м; v – скорость потока, м/с; t – время, с; N_{act} – количество перемещаемых частиц в потоке; $m_{ч}$ – масса частицы, кг; $v_{ч}$ – скорость движения частицы, м/с; c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); S – площадь приложения силы, м².

Уравнение движения воды и твердого вещества замыкается уравнениями неразрывности потока, равнодействующей скорости движения частиц и баланса кинетической энергии потока воды и твердого вещества.

Для условий равномерного установившегося движения после некоторых преобразований этого уравнения получено, что расход наносов G (кг/с), т. е. масса твердого вещества, проходящая через поперечное сечение потока за единицу времени, равен [4]:

$$G = 1,59Q \left[\frac{c}{Hg} - (1-f)1000I \right], \quad (1)$$

где Q – расход воды, м³/с.

Рассмотрим метод расчета заносимости русловых карьеров, основанный на полученной аналитической формуле расхода наносов.

Изменение транспортирующего потенциала потока Δ (кг/с) в связи с увеличением глубины и уменьшением скорости в створе руслового карьера будет равно:

$$\Delta = G_1 - G_2 = 1,59Q \left[\frac{c}{g} \left(\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_2} \right) - 10^3(1-f)(I_1 - I_2) \right], \quad (2)$$

или для условий равного уклона $I_1 = I_2$

$$\Delta = 1,59Q \frac{c}{g} \left[\frac{1}{H_1} - \frac{1}{H_2} \right], \quad (3)$$

где G_1 и G_2 – расход наносов в верхнем створе и створе руслового карьера, кг/с.

Полученная величина Δ показывает, какая масса наносов осядет в створе руслового карьера за 1 с. Для вычисления периода полного заноса карьера, следует рассчитать время, за которое объем заносающего карьер твердого вещества $V_{\text{грунт}}$ с учетом пористости последующего залегания ϕ будет равен объему карьера $V_{\text{кар}}$

$$T = \frac{V_{\text{кар}} \rho_{\text{грунт}} (1 - \phi)}{\Delta \cdot 86400}, \quad (4)$$

где T – время полного занесения карьера, сут; $\rho_{\text{грунт}}$ – плотность грунта, кг/м³; ϕ – предположительная пористость залегания осаждаемого в карьере грунта, б/р. В первом приближении можно принять $\phi = 0,3$.

Расчет проводится для установившегося движения речного потока. Для выраженного неустановившегося движения можно использовать, например, математическую модель движения воды и твердого вещества, которая и легла в основу формулы расхода наносов [4].

Исходными данными для расчета заносимости русловых карьеров служат:

- уклон реки I_1 в верхнем створе, б/р;
- уклон реки I_2 в створе карьера, б/р;
- расход воды Q , м³/с;
- средняя глубина потока в верхнем створе H_1 , м;
- средняя глубина потока в створе карьера H_2 , м.

Значения параметров f и c для речных потоков могут быть определены в соответствии с категорией крупности донных отложений по табл. 1 [4]. В настоящее время величины параметров, приведенных в табл. 1, уточняются.

Таблица 1

Значения параметров f и c в зависимости от категории крупности донных отложений

Вид донных отложений	Категория крупности донных отложений	Коэффициент внутреннего трения f , б/р	Сцепление частиц грунта при сдвиге c , кг/(м·с ²)
Суглинки	2	0,94	2,01
Песок	3	0,943	3,93
Песчано-галечные	4	0,95	5,23
Гравий	5	0,96	5,5
Галечно-гравелистые	6	0,98	5,5

Расчетная формула размыва русла в укрепленных берегах. По аналогии с заносимостью русловых карьеров, расчет размыва русла в укрепленных берегах также основывается на изменении транспортирующего потенциала потока в створе размыва и в верхнем от него створе [формулы (2) и (3)]. Тогда объем размываемого грунта $V_{\text{грунт}}$ за период времени T (сут.) будет равен

$$V_{\text{грунт}} = \frac{|\Delta| T \cdot 86400}{\rho_{\text{грунт}} (1 - \phi)}, \quad (5)$$

где Δ – масса грунта, осевшая в расчетном створе (при условии $\Delta > 0$), и размывтая (при условии $\Delta < 0$) за 1 с, вычисляется по формулам (2) или (3).

Для учета постепенного изменения гидравлических характеристик потока формула (5) примет вид:

$$V_{\text{грунт}} = \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta_i| \delta T_i \cdot 86400}{\rho_{\text{грунт}} (1 - \phi)}, \quad (6)$$

где δT_i – интервалы времени, на протяжении которых поток имеет относительно постоянные гидравлические характеристики, сут.; Δ_i – изменение транспортирующего потенциала потока в течение интервала времени δT_i , кг/с; n – количество интервалов времени с относительно постоянными гидравлическими характеристиками.

Важно подчеркнуть применимость формул (5) и (6) именно для потоков в укрепленных берегах. Очевидно, что такое ограничение объясняется тем, что для потоков в неукрепленных (размываемых) берегах при изменении транспортирующего потенциала потока будут иметь место и плановые деформации русла. Однако при ленточно-рядовом и побочном типах руслового процесса допускается расчет высотных деформаций дна без учета плановых деформаций [2].

Расчеты

Апробация формулы заносимости русловых карьеров была проведена на экспериментах, представленных в работах А.Н. Кондратьева [5] и Г.Л. Гладкова [3]. Эксперименты проводились в разное время на гидравлическом лотке шириной 2 м и длиной 50 м в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института. Гидравлические характеристики экспериментов приведены в табл. 2.

Вначале на основании данных эксперимента на лотке А.Н. Кондратьева (Кондратьев А.Н., 1998) были получены значения параметров формулы (1) f и c для гидравлического лотка минимизацией величины относительного отклонения σ_G рассчитанного $G_{\text{рас}}$ и измеренного $G_{\text{изм}}$ расхода наносов (табл. 2). Затем, на основании данных эксперимента Г.Л. Гладкова [3], был проведен расчет времени занесения руслового карьера по формуле (4). Отклонение между наблюдаемым $T_{\text{факт}}$ и рассчитанным $T_{\text{рас}}$ временем занесения руслового карьера составило 0,9 ч или, в относительных единицах, 0,66 % (табл. 2).

В табл. 2 $L_{\text{кар}}$, $H_{\text{кар}}$, $B_{\text{кар}}$ и $V_{\text{кар}}$ – длина, глубина относительно средней отметки дна, ширина и объем карьера.

Таблица 2

Данные для расчета и результаты вычислений времени занесения руслового карьера

Эксперимент А.Н. Кондратьева [5]	I , б/р	0,0022
	H , м	0,027
	Q , м ³ /с	0,01
	d , мм	0,33
	$G_{\text{изм}}$, кг/с	$2,36 \cdot 10^{-4}$

Результаты расчетов по формуле (1)	$G_{рас}, \text{ кг/с}$	$2,41 \cdot 10^{-4}$
	$\sigma_G = \frac{ G_{изм} - G_{рас} }{G_{изм}} 100\%$	2,1
	$f_s, \text{ б/р}$	0,964
	$c, \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2)$	0,025
Эксперимент Г.Л. Гладкова [3]	$I, \text{ б/р}$	0,00125
	$H_s, \text{ м}$	0,0886
	$Q_s, \text{ м}^3/\text{с}$	0,04
	$L_{кар}, \text{ м}$	3
	$H_{кар}, \text{ м}$	0,14
	$B_{кар}, \text{ м}$	0,7
	$V_{кар}, \text{ м}^3$	0,294
	$d, \text{ мм}$	0,33
Результаты расчета по формуле (4)	$T_{факт}, \text{ ч}$	136,9
	$T_{рас}, \text{ ч}$	137,8
	$\sigma_T = \frac{ T_{факт} - T_{рас} }{T_{факт}} 100\%$	0,66

Выводы

Представленные в формулах (4)–(7) расчеты периода заносимости русловых карьеров и размыва русла в укрепленных берегах основываются на аналитической формуле расхода наносов (1) и изменении транспортирующего потенциала потока Δ [формула (2)]. Преимущество такого подхода состоит в следующем:

1. Все формулы обеспечены типовой и достаточно надежной входной гидрометрической информацией (в отличие от параметров гряд, например).

2. Формулы содержат физически обоснованные параметры.

3. В формулах задействован общий расход наносов, а не только расход донных наносов, что важно при изменении гидравлических характеристик потока, которое приводит к изменению формы перемещения наносов. Учет только донных наносов в традиционных расчетах, безусловно, является упрощением, при котором искусственно проводится граница между формами перемещения наносов. Последнее не позволяет рассматривать целостность процесса движения наносов всех форм перемещения и ограничивает расчеты значительными допущениями о гидравлике потока.

Литература

1. Барышников Н.Б., Ю.А. Демидова, А.О. Пагин, А.Б. Соколов. Формулы и методы для расчета расходов донных наносов // Уч. зап. РГГМУ, 2009, № 11, с. 16–23.
2. ВСН 163–83. Учет деформаций речных русел и берегов водоемов в зоне подводных переходов магистральных трубопроводов (нефтегазопроводов). – М.: Миннефтегазстрой, 1985. – 117 с.
3. Гладков Г.Л. Обеспечение устойчивости русел судоходных рек при дноуглублении и разработке русловых карьеров: Дис. ... д-ра наук. – СПб.: СПГУВК, 1996.
4. Шамова М.В. Математическое моделирование речных потоков. – СПб.: Лема, 2011. – 76 с.
5. Kondratyev A.N. Distribution of bedload alluviums discharge on width of riverbed at passing mesoform // NATO ARW. Stochastic models of hydrological processes and their applications to problems of environmental preservation. Moscow. 1998. P. 236–238.