

ЕЛЕНА ГРЪНЧАРОВА

Институт по почвознание, агротехнологии и защита на растенията „Н. Пушкиров“, София
E-mail: eveha@abv.bg

Движение на дънни наноси – основни формули и критерии

Bedload Transport – Basic Formulas and Criteria

El. Grancharova

N. Poushkarov Institute of Soil Science, Agrotechnologies and Plant Protection, Sofia, Bulgaria

Abstract

Water resources project such as sediment transport in rivers are complex and dynamic. There are three basic items that must always be considered in bedload transport study – determination of incipient motion, bedload flux and threshold velocity.

Key words: sediment transport, incipient motion, bedload flux and threshold velocity

Саморегулируемостта и взаимното влияние на течението и леглото в естествените реки придава изключителна динамичност на процесите, произтичащи от това взаимодействие. Течението променя напречното сечение на реката, а неговата промяна предизвиква изменение на скоростта и посоката на потока. В зависимост от баланса между транспортиращата способност на течението и наносното количество се получава или ерозия или отлагане на наноси.

Изследванията, свързани с движението на дънните наноси в естествените реки, най-общо, изхождат от дефинирането на: момента на задвижване на дънните наноси, определяне на критичната неизравняща скорост на течението и определяне на наносното количество.

Материал и методи

При движението си течението обтича частите, намиращи се на речното дъно, повдига и придвижва някои от тях. Моментът на началото на движение на дънните частици настъпва, когато тангенциалното напрежение на дъното превиши критичната си стойност и тогава седиментите започват да се търкалят по него. Колкото е по-голяма скоростта на те-

чението, толкова повече расте и тангенциалното напрежение и повече частици с различен диаметър се включват в движението.

1. Начало на движение на дънните наноси

Едни от най-надеждните критерии за определяне на момента на началото на задвижване на дънните наноси са: Критерий на Shields, Yang [14] и Widberg and Smith [19].

Диаграмата на Shields дава зависимост между модифицираните числа на Reynolds и Froude (фиг. 1) и е най-популярният и най-надежден критерий.

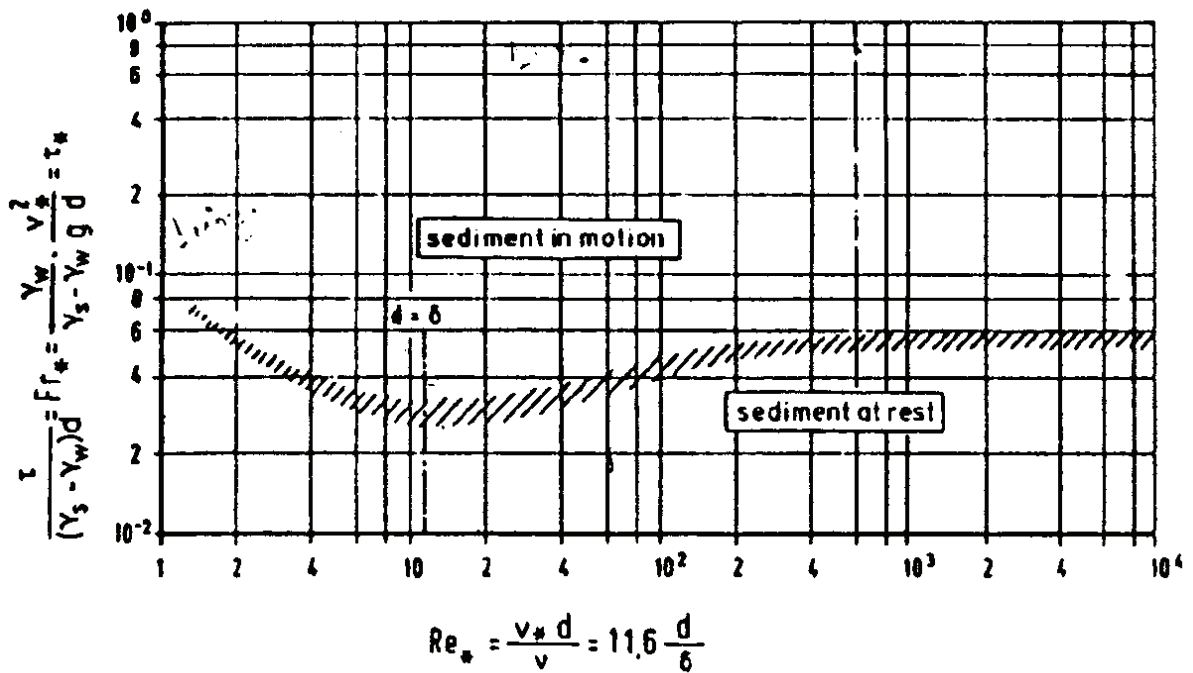
В случаите на изследване на влиянието на течението върху хидротехническо съоръжение по-подходящ е критерият на Yang [11]:

$$(1.1) \quad \frac{v_{crit}}{\omega_0} = \frac{2.5}{\log Re^* - 0.06} + 0.66$$

за $0 < Re^* < 70$ и за $Re^* > 70$:

$$(1.2) \quad \frac{v_{crit}}{\omega_0} = 2.05,$$

където v_{crit} е неизравняща скорост; ω_0 - хидравлична едрина; Re^* - модифицираното число на Reynolds.



Фиг. 1. Диаграма на Shields
Fig. 1. Shields Diagram

Критерият на Wiberg and Smith [19] се изразява в описанието от механична гледна точка на траекторията на движение на една частица от речното дъно. Чрез решение на уравнението на движение на частицата се дава позицията на подкачащата частица като функция на времето и така се определя критичното тангенциално напрежение за момента на задвижване на наносите. В същността си подходът е както при Van Rijn [17, 18]. Посредством семпла формула за определяне на концентрацията на дънни наноси, като функция на характеристиките на потока и седиментите се изчислява и наносното количество (1.3).

$$(1.3) \quad q_* = 0.00033 d_*^{0.3} \left(\frac{v_*^2 - v_{*crit}^2}{v_{*crit}^2} \right)^{1.5},$$

където q_* е наносното количество; d_* - бездименсионален диаметър на частиците на дъното; v_* - скорост на тангенциалното напрежение; v_{*crit} - критична стойност на скорост на тангенциалното напрежение.

Критичната стойност на скоростта на тангенциалното напрежение се определя съгласно Диаграмата на Shields, така че тези два метода в същността си не са нови.

Разликата се състои в това, че формула (1.3) не съдържа коефициенти, които е необходимо

да бъдат опитно установени и верифицирани.

2. Критични неизравящи скорости

За начало на придвижване на дънните частици може да се смята както трептенето на отделни частици от дъното, така и масовото им придвижване. Средната скорост между двете състояния е критична неизравяща скорост.

Формулите, представени в табл. 1 определят критичната скорост спрямо средната по вертикала, но при увеличение на пулсацията на скоростта расте и дънната скорост. При равни средни скорости, пулсацията на дънната скорост достига до два и повече пъти средната.

Определянето на критичната неизравяща скорост по дънната е по-правилно от хидродинамична гледна точка и Ибад-Заде [4] предлага такава зависимост:

$$(2.4) \quad v_{crit} = \sqrt{2K_y} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d},$$

където K_y е коефициент; γ_s - обемно тегло на наносите; γ - обемно тегло на водата.

Формула (2.4) не зависи от вида на граничния слой и е надеждна за течения, при които Рейнолдсовите напрежения са пренебрежими. Получените стойности са занижени спрямо

Таблица 1. Критични неизравящи скорости
Table 1. Threshold velocity

Автор	Формула	Забележка
Леви [7]	$v_{crit} = 1.4\sqrt{gd} \lg \frac{8.8h}{d_{90}}$	
Шамов [8]	$v_{min\ crit} = 4.6\sqrt{d} \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6}$	За наноси с $d \geq 1,5 \text{ mm}$
Кнорз [2]	$v_{m\ crit} = 25d^{0.3} \lg \frac{3.6R}{d^{1.6}}$	[cm]
Мирцхулава [7]	$v_{crit} = \lg \left(\frac{8.8h}{D}\right) \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)d}{0.44\gamma_s} + 2C_y}$	
Дюбоа, Орлова, Мевис [6]	$v_{m\ crit} = 0.152d^{4/3} \sqrt{\gamma_s - 1}$	
Bogardy [15]	$v_{m\ crit} = 22.9d^{4/9} \sqrt{\gamma_s - 1}$	
Sunborg [2]	$v_{m\ crit} = 5.75 \lg \left(\frac{30.2H}{d}\right) \sqrt{\frac{2g\delta_1\delta_2(\gamma_s - \gamma)d}{3\gamma} - \lg\varphi}$	
Бочков [16]	$v_{crit} = 3.9\sqrt{1 + \frac{0.0004}{d}} \sqrt{gd}$	
Гончаров [3]	$v_{min\ crit} = \lg \left(\frac{8.8h}{d}\right) \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)}{3.5\gamma} d}$	За $d > 0,35 \text{ mm}$
Студеничников [1, 4]	$v_{crit} = 1,15 \cdot \sqrt{g \cdot d} \cdot \sqrt[4]{\frac{H}{d}}$	
Nagi-Karadi-Kalmar [15]	$v_{crit} = 1.4 \ln \frac{H}{7d} \sqrt{g \cdot d}$	
Латишенков [1, 4]	$v_{crit} = 1,6 \cdot \sqrt{g \cdot d} \cdot \sqrt[5]{\frac{H}{d}}$	
Neil [12]	$v_{crit} = 2.5gd^5 \sqrt{\frac{H}{d} \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}}$	

мо реалните, а и в речните течения граничният слой е изцяло турбулизиран. И съгласно [5] Казаков въвежда и модифицираното число на Reynolds като формулата добива вида:

$$(2.5) v_{crit} = \sqrt[6]{Re_*} \sqrt{2Ky} \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd}$$

Ако от вертикалното разпределение на скоростите са известни само тези за повърхност и 0,6 от дълбочината на течението [7], то за дънната скорост се определя по формула:

$$(2.6) v_{crit} = 2v_m - v_{surf} - \frac{Kv_*}{3\sqrt{g}}$$

където v_{surf} е повърхностната скорост.

3. Теоретични формули за наносен транспорт

В литературните източници съществуват повече от 100 формули за определяне на седиментния транспорт. Някои от тях са изведени на база на натурни данни, други – на база на лабораторни изследвания. Изследва-

Таблица 2. Наносен транспорт
Table 2. Bedload flux

Автор	Формула	Забележка
Шоклич и Шафернак [15]	$G_s = \frac{7}{\gamma_w J^{5/6} \sqrt{d}} (QJ^{4/3} - 0.00001944bd)$	
Meyer-Peter and Muller [15]	$q_s = \frac{8}{\sqrt{\rho_w}} (\tau_b - 0.047(\gamma_s - \gamma_w) d_{50})^{3/2}$	
Einstein [13]	$q_s = \frac{\alpha(\delta_s - \delta_w) d_{50}}{\alpha_1} \frac{L}{T} \sum_1^{\infty} P_n$	
Selim Yalin [13]	$q_s = 0.635 \sqrt{(s-1)gd^3} r \sqrt{Fr^*} \left[1 - \frac{1}{\sigma r} \ln(1 + \sigma r) \right]$	
Nagakawa-Tsujimoto [18]	$q_s = 0.02 \rho_s Fr_* \sqrt{(s-1)gd_{50}} \left[1 - \frac{0.035}{Fr_*} \right]^3$	d < 0,2 mm
De Ruiter [18]	$q_s = 0.016 \rho_s P \left[(s-1) \left(\frac{\sigma}{\tau_{0crit}} \right) (gd_{50} \tan \phi) \right]^{0.5}$	d > 1 mm
Van Rijn [18]	$q^* = \frac{0.053}{d^{*0.3}} \left(\frac{Fr^*}{Fr_{crit}^*} - 1 \right)^{2.1}$	
Nielsen	$q^* = 12 (Fr^* - Fr_{crit}^*) \sqrt{Fr^*}$	
Soulsby	$Fr_{crit}^* = \frac{0.3}{1 + 1.2d^*} + 0.055 \left[1 - \exp(-0.02d^*) \right]$	
Ackers and White [9]	$G_s = C \left(\frac{F_s}{A} - 1 \right)^m$	Не се влияе от дънните форми; за еднороден d
Gao [10]	$G_s = 0.9 \rho g H J V_m$	За високи води

нето на процеса е свързано с много теоретични предпоставки, опростяване и презумпции. Различните изследователи използват един или два доминиращи фактора – тангенциалното напрежение в дъното, водното количество, средна скорост на течението, хидравличния наклон. Изследователи като Shields, Meyer-Peter изхождат от нарастване на тангенциалното напрежение, Einstein – прилага теория на вероятностите, Yalin – транспортиращата способност на течението. Някои формули съдържат скорост и дълбочина на течението, други – водно количество и наклон, трети – дълбочина и наклон. Най-популярни са зависимостите, изразяващи наносното количество чрез τ_b , d и ρ .

Където G_s е теглово наносно количество; J -

хидравличен наклон; b - ширина на речното легло; Q - водно количество; τ_b - тангенциално напрежение в речното дъно; δ_s - специфично тегло на наносите; δ_w - специфично тегло на водата; Fr_* - модифицирано число на Froude; C - коефициент.

През последните години се популяризира определянето на наносното количество чрез изкуствени невронни мрежи. Според изследвания [20] при модели с 4 входящи хидравлични характеристики – средна скорост на течението, хидравличен наклон, средна дълбочина и d_{50} , ANN успява да предвиди наносното количество достатъчно акуратно. Обаче при наличие на три входящи параметъра, точността на получените резултати е както при известните вече емпирични зависимости.

Изводи

Формулите за определяне на критичната неизравяща скорост са приложими за специфични условия – вид на реката, леглото и хидравличния наклон, теглото и формата на наносите, температура на водата и т. н. Получава се голяма разлика в резултатите на различните автори и подборът на формула за определяне на критичната неизравяща скорост зависи от конкретиката на изследването и особеностите на реката.

На практика нито едно от предложените уравнения за седиментния транспорт не може да бъде приложено за всички видове реки. За акуратно прогнозиране на наносното количество се налага да се работи по метода на пробата и грешката, докато се идентифицира подходящото за изследването уравнение. Прогнозата за наносното количество се прави на база на прогнозата за очакваните дълбочини на теченето и това е една от най-важните независими променливи в уравненията за седиментния транспорт.

Във формулите се съдържат множество коефициенти, които се определят от измервания на натурни наносни количества. В съчетание с разнородния състав на отложенията в естествените реки и различията при протичането на ерозионните процеси при тях, както и данни за скоростите на течението, скоростното поле и разпределението на скоростите по дълбочина, както и изборът на характерни водни количества, емпиричните зависимости дават по-скоро ориентировъчни стойности за наносния транспорт.

По-точно взаимодействие между формата на речното легло и разпределението на водното количество се постига с физичното моделиране, притежаващо допълнителни похвати, които позволяват да се симулират цялостните процеси, протичащи в речното легло.

Литература

- 1. Абальянц, С.** 1981. Устойчивые и переходные режимы в искусственных руслах. *Гидрометеоздат*, Ленинград.
- 2. Гаджев, Г.** 1975. Движение на наносите. *БАН, С.*
- 3. Гончаров, В. Н.** 1962. Динамика русловых потоков. *Гидрометеоздат*, Ленинград.
- 4. Ибад-Заде, Ю. А.** 1983. Транспортирование воды в открытых каналах. Москва.
- 5. Казаков, Б.** Хидравлични изследвания, свързани с техническото водоснабдяване на АЕЦ „Белене“. Годишник на ВИАС 1985-1986; Св. 9.
- 6. Маринов, Е., Б. Казаков, М. Мараджиева, Ив. Минков.** 1994. Хидравлика. *ВИАС*, София.
- 7. Мирцхулава, Ц. Е.** 1967. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. *Колос*, Москва.
- 8. Шамов, Г. И.** 1954. Речные наносы. *Гидрометеоздат*, Ленинград.
- 9. Ackers, P., W. R. White.** 1973. Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of Hydraulic Division*, p. 2041
- 10. Gao, P.** 2011. An equation for bed-load transport capacities in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology*, 402, p. 297
- 11. Gaucher, J., Cl. Marche, T. Mahdi.** 2010. Experimental Investigation of the Hydraulic Erosion of Noncohesive Compacted Soils. *Journal of Hydraulic Engineering*, p. 901
- 12. Graff, W.** 2001. Fluvial Hydraulics, Flow and transport processes in channels of simple geometry. *John Wiley & Sons.*
- 13. Hug, M.** 1975. Mécanique des fluids appliqué. *Eyrolles*, Paris.
- 14. Mash, N., A. Western, R. Grayson.** 2004. Comparison of Methods for Predicting Incipient Motion for Sand Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, p. 616
- 15. Quesnel, B.** 1974. Traité d'hydraulique fluviale et torrentielle appliqué. *Eyrolles*, Paris.
- 16. Tadger, J., B. Kazakov, G. Tzerovska et al.** Hydraulic Model Tests of the Danube River Bank between km 537 and 539, Proc. UACG, Sofia.
- 17. Van Rijn, L. C.** 1982. Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (10), p. 1431
- 18. Van Rijn, L. C.** 1984. Sediment Pick-up Function. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (10), p.1494
- 19. Widberg, P. L., Smith, J. D.** 1989. Model for calculating bed load transport of sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (1), p. 101
- 20. Yang, Ch. T., R. Marsooli and M. T. Aalami.** 2009. Evaluation of total load sediment transport formulas using ANN. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 3, p. 274