

შპს 628.1

## ნაწილაკების ფორმის გავლენა ჰიდრაულიკურ სისხოზე ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის დროს

ზ. გვიშიანი, დ. გურგენიძე, ზ. ცინაძე, ს. ბუკია

(საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი)

**რეზიუმე:** განხილულია ნაწილაკების ფორმის გავლენა ჰიდრაულიკურ სისხოზე ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის ამოცანებში. კვლევის შედეგად მიღებული მონაცემები წარმოდგენილია გრაფიკული და ემპირიული დამოკიდებულებების სახით. დადგინდა, რომ მიღებული ემპირიული დამოკიდებულებების გამოყენება საინჟინრო პრაქტიკაში შესაძლებელია.

**საკვანძო სიტყვები:** ჩამდინარე წყლები; მექანიკური გაწმენდა; ჰიდრაულიკური სისხო; ნაწილაკების ფორმის გავლენა.

### 1. შუსაგალი

ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის ამოცანების გადაჭრისას სანიაღვრე ან გაერთიანებული წყალარინების სისტემებში კატასტროფული ატმოსფერული ნალექების დროს დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ზედაპირული წყლების მყარი ფაზის გრანულომეტრიული შედგენილობისა და ნაწილაკების ფორმის გათვალისწინებას [1,3,4,6,10,19,20,21].

### 2. ძირითადი ნაწილი

ნაწილაკების წყალში ვარდნისას, ვარდნის რეჟიმის მიუხედავად, ჰიდრაულიკური სისხოს კლასიკურ მოდელში საჭიროა ნაწილაკის ფორმის გათვალისწინება. ცნობილია ავტორთა [7,8,11,12,13,14,16,17,18] ნაშრომები და პრაქტიკაში აპრობირებუ-

ლი დამოკიდებულებები. მაგალითისათვის განვიხილოთ ა.ბ.ვექსლერის [6,12] დამოკიდებულება:

$$w = \frac{\left(\frac{\rho_2 - 1}{\rho_1}\right)}{g \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2}{45} Re_d^2}\right)} \left(1 - \frac{3}{4} \frac{1 + 1.75 \cdot 10^{-12} Re_d^5}{\left(1 + \frac{24}{Re_d}\right)^2 - \frac{44}{Re_d} + 1.75 \cdot 10^{-12} Re_d^5}\right)^{-1/2}, \quad (1)$$

სადაც 
$$Re_d = \frac{d}{\nu} \sqrt{\left(\frac{\rho_2 - 1}{\rho_1}\right) g d}.$$

ჰიდრავლიკური სისხოს ფორმულა (1), ლამინარული რეჟიმის დროს ( $Re < 1$  და ნაწილაკების დიამეტრი  $d$  0.05 მმ-ზე), სტოქსის ფორმულის სახეს იღებს:

$$w = \frac{gd^2(\rho_2 - \rho_1)}{18\nu}, \quad (2)$$

ხოლო ტურბულენტური რეჟიმის დროს ( $Re \geq 400$  და ნაწილაკების დიამეტრი  $d > 2.5$  მმ-ზე)

$$w = \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{0.9\rho_1} g d}, \quad (3)$$

სადაც  $d$  ნაწილაკის დიამეტრია;  $g$  - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება;  $\rho_2$  - ნაწილაკის სიმკვრივე;  $\rho_1$  - სსნარის სიმკვრივე;  $\nu$  - სიბლანტის კინემატიკური კოეფიციენტი.

ნაწილაკის ფორმის  $\beta_w$  კოეფიციენტი ა.ბ. ვექსლერის (4) დამოკიდებულებით განისაზღვრება, რომელიც, თავის მხრივ, ვ.ვ. რომანოვსკის [12,15] ემპირიულ მონაცემებს ეყრდნობა:

$$\beta_w = 1 + \frac{2.40 - 1.75}{1 + \left(\frac{75}{Re}\right)^2}, \quad (4)$$

სადაც 
$$\theta = \frac{d^2}{ab},$$

$d$  დაყვანილი დიამეტრია,  $a$  და  $b$  - ნაწილაკის უდიდესი კვეთის სიგრძე და სიგანე.

ჩატარებულმა კვლევებმა ცხადყო, რომ ნაწილაკთა ვარდნის ლამინარული რეჟიმის დროს ფორმა გავლენას არ ახდენს და  $\beta_w=1$ , ხოლო ტურბულენტური რეჟიმის დროს, როდესაც  $Re \geq 400$ , (4) მარტივდება:

$$\beta_w = 2.4\theta - 0.75. \quad (5)$$

რ.ს. რეტინგერმა შეიმუშავა ჰიდრაულიკური სისხოს ფორმულა [11,15] ტურბულენტური რეჟიმის დროს:

$$w = K_p \sqrt{d(\delta - 1)}, \quad (6)$$

სადაც  $K_p$  ნაწილაკის ფორმის კოეფიციენტი;  $\delta$  – ნაწილაკის ფარდობითი სიმკვრივე.

ექსპერიმენტული გზით რ.ს. რეტინგერმა განსაზღვრა ნაწილაკის ფორმის კოეფიციენტის მნიშვნელობა: სფეროსებრი ნაწილაკებისათვის – 2.73, წახნაგოვანი ფორმისათვის – 2.97, ფირფიტოვანი ფორმისათვის – 1.97.

მ.ა. ველიკანოვმა და ა.პ. ზეგუდამ [4,5,6,15] საკუთარ და სხვა მეცნიერთა ექსპერიმენტულ კვლევებზე დაყრდნობით სფეროსებრი ნაწილაკებისათვის მიიღეს ემპირიული დამოკიდებულება:

$$\frac{gd \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right)}{w} = 0.105 + 4.5 Re^{-1} + \frac{2.655}{\pi} \arctg \sqrt{Re^{-1}}, \quad (7)$$

სადაც 
$$Re = \frac{wr}{\nu}.$$

გამოსახულება (7) მარტივი გარდაქმნების შემდეგ სტოქსის ფორმულის სახეს იღებს მცირე ზომის ნაწილაკებისათვის, ხოლო მსხვილი ნაწილაკების შემთხვევაში – რეტინგერისას. გასათვალისწინებელია, რომ  $d$  ეკვივალენტური დიამეტრია.

ნაწილაკების ფორმის ჰიდრაულიკურ სისხოზე გავლენის მიზნით ჩატარდა ექსპერიმენტული კვლევა სპეციალურ მოწყობილობაზე, რომლის მოქმედების პრინციპი მდგომარეობს გადამწოდთა მიერ გაგზავნილ სიგნალთა დროის შუალედის ფიქსირებაში. სიგნალები წარმოიქმნებოდა გადამწოდების გასწვრივ მაგნიტური მტვერით დანიშნული ნაწილაკების ჩავლისას. გადამწოდებს შორის მანძილი 500 მმ-ია. ხელსაწყოს ტარირებისას განისაზღვრა ცდომილება, რომელმაც  $\pm 0.15\%$  შეადგინა. ექსპერიმენტი ჩატარებულ იქნა სფეროსებრი, მრავალწახნაგოვანი და ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკებზე, რომელთა დიამეტრი 0.1 მმ-დან 10 მმ-მდე იცვლებოდა.

ექსპერიმენტების დროს ნაწილაკები ვარდებოდა წყლის ზედაპირიდან მილის ღერძის გასწვრივ. შედეგები წარმოდგენილია ნახაზზე.

მონაცემების მათემატიკური სტატისტიკის მეთოდებით დამუშავების შემდეგ მიღებულია ემპირიული დამოკიდებულებები:

სფეროსებრი ფორმის ნაწილაკებისათვის:

$$u_0 = 112.0d - 1.96; \quad (8)$$

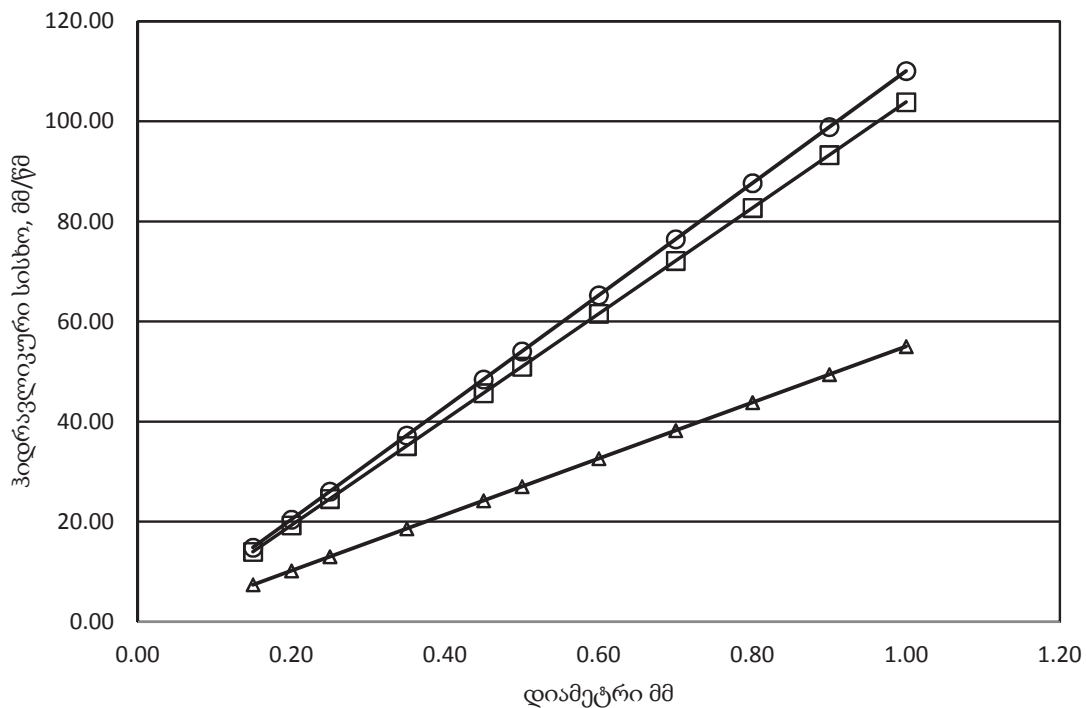
მრავალწახნაგოვანი ფორმის ნაწილაკებისათვის:

$$u_0 = 105.7d - 1,85; \quad (9)$$

ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკებისათვის:

$$u_0 = 56d - 0,98, \quad (10)$$

სადაც  $u_0$  ნაწილაკების ჰიდრაული სისხო, მმ/წმ;  $d$  – ნაწილაკების დიამეტრი, მმ.



სხვადასხვა ფორმის ნაწილაკის ჰიდრაული სისხო:  
 ○ – სფეროსებრი; □ – მრავალწახნაგოვანი; △ – ფირფიტოვანი

(8), (9) და (10) გამოსახულებებისათვის განისაზღვრა საშუალო კვადრატული გადახრა, რომელმაც შესაბამისად  $R^2 = 0.995$ ,  $R^2 = 0.993$  და  $R^2 = 0.998$  შეადგინა. მიღებული მნიშვნელობები პრაქტიკაში გამოიყენება.

ცდების შედეგების ანალიზმა გვიჩვენა (ნახაზი), რომ სფეროსებრი და მრავალწახნაგოვანი ფორმის ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს მნიშვნელობები განსხვავდება, მაგრამ ერთმანეთთან მიახლოებულია. მათთვის აღინიშნა ნაწილაკთა ვარდნის სამი რეჟიმის არსებობა - ლამინარული, გარდამავალი და ტურბულენტური. როდესაც ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს შემცირებისაკენ საგრძნობი გადახრა ჩანს, ადგილი აქვს ვარდნის ლამინარულ და გარდამავალ რეჟიმებს, რაც განპირობებულია ფირფიტოვანი ფორმის თავისებურებით. კერძოდ, ნაწილაკის წყალში ვარდნისას უდიდესი წიბო ორიენტირებულია მოძრაობის მიმართულების პერპენდიკულარულად [9,17]. შესაბამისად, იზრდება წყლისა და ნაწილაკის შეხების ფართობი და წინაღობის ძალის მნიშვნელობა. გამოკვლეული ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკების დიამეტრთა მთელ დიაპაზონში ვარდნისას აღინიშნა ჰორიზონტალურ სიბრტყეში მარჯვნივ და მარცხნივ გადაადგილება, რასაც პირობითად "ფრიალი" ვუწოდეთ. ეს მოვლენა ვარდნასაც აფერხებს.

მონაცემთა დამუშავების შემდეგ ეტაპზე მიღებული დამოკიდებულება (8), (9) და (10) ემპირიულ ფორმულებს აერთიანებს:

$$u_0 = [112.04d - 1,96] / \kappa_{\text{ფ}} \quad (\text{მ/წმ}), \quad (15)$$

სადაც  $d$  ნაწილაკის დიამეტრია მმ;  $\kappa_{\text{ფ}}$  – ფორმის კოეფიციენტი, უგანზომილებო სიდიდე, მისი მნიშვნელობებია: სფეროსებრი ფორმისთვის - 1, მრავალწახნაგოვანი ფორმისთვის - 1.06, ფირფიტოვანი ფორმისთვის - 2;  $\rho = 2.65 \text{ გ/სმ}^3$  – ნაწილაკთა სიმკვრივე.

მიღებული შედეგების შესამოწმებლად განვიხილოთ მაგალითი. განვსაზღვროთ ჰორიზონტალური ქვიშადამჭერის სიგრძე.

**მოცემულია:** ჩამდინარე წყლების მაქსიმალური და მინიმალური ხარჯები, შესაბამისად,  $q_{\text{max}} = 0.75 \text{ მ}^3/\text{წმ}$  და  $q_{\text{min}} = 0.25 \text{ მ}^3/\text{წმ}$ ; წყლის სიღრმე მიმწოდებელ არხში მაქსიმალური ხარჯის დროს –  $h = 0.9 \text{ მ}$ ; წყლის ნაკადის სიჩქარე მაქსიმალური ხარჯის დროს –  $V_{\text{max}} = 300 \text{ მმ}/\text{წმ}$ ; დასალექი ნაწილაკების დიამეტრი –  $d = 0.25 \text{ მმ}$ ; წყლის ტემპერატურა –  $20^\circ\text{C}$ .

**ამოხსნა.** მოცემული დიამეტრის ნაწილაკებისათვის ჰიდრაულიკური სისხოს მნიშვნელობა განისაზღვრება (15) დამოკიდებულებით. სფეროსებრი ნაწილაკებისათვის –  $u_0=26,05$  მმ/წმ, მრავალწახნაგოვანისათვის –  $u_0=24,57$  მმ/წმ, ფირფიტოვანი ფორმისათვის –  $u_0=13,02$  მმ/წმ.

w ნაკადის სიჩქარის ვერტიკალური ტურბულენტური მდგენელი განისაზღვრება ფორმულით:  $w = 0.05V_{max}=0.05 \times 300=15$  მმ/წმ (გაანგარიშება გრძელდება ცხრილში).

საანგარიშო ფორმულა	ნაწილაკების ფორმა				
	სფეროსებრი $d = 0.25$ მმ	მრავალწახნაგოვანი $d = 0.25$ მმ	ფირფიტოვანი		
			$d = 0.3$ მმ	$d = 0.45$ მმ	$d = 0.5$ მმ
ნაწილაკების დალექვის სიჩქარე (მმ/წმ): $u = \sqrt{u_0^2 - w^2}$	21.3	19.5	5.0	19.0	22.5
ქვიშადამჭერის სიგრძე (მ): $L = \frac{V_{max} \cdot h}{u}$	12.0	13.0	53.6	14.2	12.0

ცხრილიდან ჩანს, რომ სფეროსებრი და მრავალწახნაგოვანი ნაწილაკებისთვის ქვიშადამჭერის სიგრძე L (მ) ერთ დიაპაზონშია.

იმ შემთხვევაში, როცა ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკების ეკვივალენტური დიამეტრი 0,25 მმ-ია, მისი ჰიდრაულიკური სისხო 13,02 მმ/წმ-ია, ნაწილაკის დალექვის სიჩქარის ფორმულაში

$$u = \sqrt{u_0^2 - w^2} \tag{16}$$

ფესვქვეშა გამოსახულება უარყოფით მნიშვნელობას იღებს. ეს მიანიშნებს, რომ ნაწილაკი მოცემულ პირობებში არ დაილექება - დარჩება შეტივნარებული.

ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკების ეკვივალენტური დიამეტრის ზრდა იწვევს ქვიშადამჭერის სიგრძის შემცირებას. 0,25 მმ სფეროსებრი ფორმის ნაწილაკის დიამეტრის და 0,5 მმ ფირფიტოვანი ფორმის ნაწილაკის ეკვივალენტური დიამეტრის დროს ქვიშადამჭერის სიგრძე L (მ) ერთმანეთთან მიახლოებულია.

### 3. დასკვნა

ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის საფეხურზე ნაგებობათა ჰიდრაულიკური გაანგარიშებისას ნაწილაკების ეკვივალენტური დიამეტრით ოპერირება მიზანშეწონილი არ არის.

ცხრილში წარმოდგენილი გაანგარიშება ცხადყოფს, რომ ქვიშადამჭერის ოპტიმალური ზომების დასადგენად აუცილებელია ნაწილაკების ფორმის გავლენის გათვალისწინება ჰიდრაულიკურ სისხოზე.

ჩამდინარე წყლების ქვიშადამჭერის ზომების დაზუსტება წყლის გაწმენდის ეფექტურობის ამაღლების საშუალებას იძლევა.

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის პირველ საფეხურზე მიღებული დადებითი ეფექტი – წინასწარ განსაზღვრული დიამეტრის ნაწილაკების მოცილება – გაწმენდის სრული ციკლისა და მისი ეკონომიკური ეფექტურობის ამაღლებას იწვევს.

### ლიტერატურა

1. დ. გურგენიძე, ნ. კიკნაძე, მ. ნაცვლიშვილი, ლ. კლიმიაშვილი. წყლის გაწმენდის მეთოდების შესახებ სამრეწველო წყალმომარაგებაში // ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", №1-2 (13-14), თბილისი: სტუ, 2012.
2. ლ. კლიმიაშვილი. წყლის მიწოდების და განაწილების სისტემების საიმედოობა. თბილისი: სტუ, 2011.–409 გვ.
3. Бабаев И.С. Безреагентные методы очистки высокоомутных вод. Серия: Наука - строительному производству. М.: Стройиздат, 1978 г.–82 с.
4. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т. 1: Структура потока. – М.: Гостехиздат: Изв. АН, 1954. — 323 с.
5. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т. 2: Наносы и русло. – М.: Гостехиздат, 1955. –323 с.
6. Великанов Н.Л. Моделирование осаждения твердых частиц в пульпопроводе. Наука и техника транспорта. 2011. № 2. с. 69–78.
7. Гвишиани З.Г. К моделированию гидравлической крупности частиц в условиях стесненного падения в глинисто-коллоидной суспензионной среде // Тезисы докладов научно-технической конференции. Тбилиси, 1989. – 86 с.

8. Гвишиани З.Г. Гидравлическая крупность крупных включений солей в глинисто-коллоидных растворах различной концентрации // Тезисы докладов научно-технической конференции. Тбилиси, 1991, с. 34-35.
9. Гургенидзе Д., Намгаладзе Д., Применение теории катастроф для определения критических чисел Рейнольдса при движении дисперсной среды // Georgian Engineering News, N1. Tbilisi, 2007.
10. Дроздов Е.В., Журавлева И.В. Расчет гидравлической крупности частиц загрязнений сточных вод // Науч. вестн. Воронеж. гос. архитектур.-строит. ун-та. Строительство и архитектура, 2009, № 2. С. 29–35.
11. Караушев А.В. Речная гидравлика. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1969.– 205 с.
12. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Энергия, 1972.– 312 с.
13. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. М.: Стройиздат, 1971.– 579 с.
14. Марков Ю.А., Смолдырев А.Е. Гидравлическая крупность частиц горных пород при свободном и стеснённом падении // Горный журнал, 1960, № 3, с.34–40.
15. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов с 34.21.204-2005. Санкт-Петербург, 2006.
16. Пособие по проектированию гидравлического транспорта к СНиП 2.05.07-87. М.: Стройиздат, 1988.
17. Юрезанская Ю., Котеров В. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе: Теория и практика моделирования. – [Б. м.]: Lambert Academic Publ., 2011. 116 с.
18. В.А. Benninger (1984) Determining Extraneous Flows in Waste Water Systems , Canadian Water Resources Journal, 9:3, 40-44, DOI: 10.4296/cwrj0903040. To link to this article: <https://doi.org/10.4296/cwrj0903040>
19. Joel E., Bowdan III. Sanitary sewer study report for the southwestern college campus. Michael Baker International. 9755 Clairemont Mesa Blvd. San Diego, CA 92124. 2016. <http://www.swccd.edu/modules/showdocument.aspx?documentid=14996>
20. Tilley E., Ulrich L., Lüthi, C., Reymond Ph., Zurbrügg C. (2014) Compendium of Sanitation Systems and Technologies - (2nd Revised Edition). Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Duebendorf, Switzerland. ISBN 978-3-906484-57-0.
21. Waste Water Treatment Compound Property Processor Air Emissions Estimator (WATER 7), U. S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, available early 1992.