

შპს 628.339

## ჩამდინარე წყლების სალექრებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკის კვლევა

ი. ინაშვილი, ი. დენისოვა

(საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი)

**რეზიუმე:** სტატიაში განხილულია ჩამდინარე წყლების გაწმენდის დროს, სალექრებში გრავიტაციული დალექვისას, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკა. ლაპლასის პიფსომეტრულ კანონზე დაყრდნობით, მიღებულია შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის, დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლება. განსაზღვრულია შეწონილი ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობა. გამოთვლილია, რა სიღრმეზე ხდება ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის გადასვლა გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმში.

**საკვანძო სიტყვები:** ჩამდინარე წყლები; სედიმენტაცია; ჰიდრავლიკური სისხო; ზღვრული კონცენტრაცია; ნაწილაკის გარსშემოდენის რეჟიმი.

### 1. შესავალი

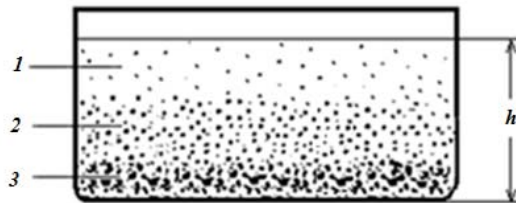
ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ყველაზე მარტივი და ეფექტური საშუალებაა შეწონილი, დისპერსიული მინარევების მოშორება სედიმენტაციით (დალექვით). სედიმენტაციის პროცესი მიმდინარეობს გრავიტაციული ძალების ზეგავლენით, თვითნებურად, სპეციალურ ნაგებობებში – სალექრებში.

სალექრებს იყენებენ ჩამდინარე წყლების საბოლოო გაწმენდისთვის (მხოლოდ უხსნარი მინარევების მოშორების საჭიროების შემთხვევაში) ან როგორც მოსამზადებელ ეტაპს ბიოლოგიური გაწმენდის წინ, ამიტომ სალექრების გაანგარიშებისათ-

ვის ჩამდინარე წყლების დაღეკვისას მიმდინარე პროცესების კვლევას დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება.

ვინაიდან ჩამდინარე წყლები პოლიდისპერსიული, ჰეტეროგენული, აგრეგატულად არამდგრადი სისტემაა, ამიტომ საღეკრების გათვლისას აუცილებელია ძირითადი საანგარიშო პარამეტრების სწორი განსაზღვრა. ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევისას უმნიშვნელოვანესი პარამეტრებია შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრაულიკური სისხო (დაღეკვის სიჩქარე) და მათი კონცენტრაცია.

საღეკრებში გრავიტაციული დაღეკვისას შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია თანდათანობით იზრდება წყლის ზედაპირიდან საღეკრის ფსკერის მიმართულებით (ნახ. 1). თავისუფალი დაღეკვის ზონის ქვემოთ (1) ყალიბდება შეზღუდული დაღეკვის (2) და ნაღეკის გამკვრივების (3) ზონები. რეალურობაში შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვისას ძირითად ზონებს შორის წარმოიქმნება მცირე სისქის მქონე გარდამავალი ზონები.

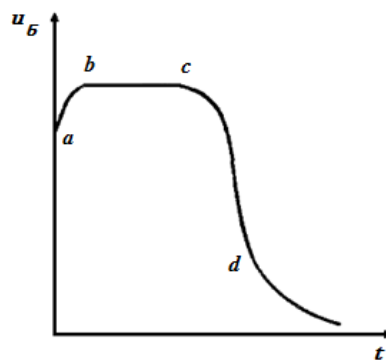


ნახ.1. საღეკარში შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვის პროცესის სქემა

1- თავისუფალი დაღეკვის ზონა; 2 - შეზღუდული დაღეკვის ზონა;

3 - ნაღეკის გამკვრივების ზონა

განვიხილოთ ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების სედიმენტაციისას კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკა.



ნახ. 2. შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი

დალექვის საწყის ეტაპზე (ნახ. 2) ნაწილაკების მოძრაობა აჩქარებულია (მონაკვეთი *ab*). ნაწილაკებზე მოქმედი ძალების დინამიკური წონასწორობის დამყარების შემდეგ, როდესაც წინაღობის ძალა გაუტოლდება სიმძიმის ძალისა და ამომგდები ძალის ტოლქმედს, ნაწილაკები იძენს მუდმივ სიჩქარეს (მონაკვეთი *bc*). ნაწილაკების კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად თავს იჩენს შეზღუდული დალექვა, რომლის დროსაც დისპერსიული ფაზის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად ჩნდება დამატებითი ძალები. კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად იზრდება ჰიდროდინამიკური წინააღმდეგობა. ყოველივე ეს იწვევს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის კლებას (მონაკვეთი *cd*). დალექვის პროცესის ბოლო ფაზაზე ხდება ნალექის გამკვრივება. კონცენტრაცია იმდენად იზრდება, რომ რთულდება სითხის შეღწევა ნაწილაკებს შორის. ამ პროცესის დროს ნაწილაკთა დალექვის სიჩქარე ძალიან მცირეა [1, 2, 3, 4, 5].

## 2. პირითადი ნაწილი

განვსაზღვროთ ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულება. ამისათვის, შეგვიძლია ვისარგებლოთ ლაპლასის ჰიფსომეტრული კანონით, რომელიც პერენმა გამოიყენა მყარდისპერსიული სისტემისთვის. პერენმა დაადგინა, რომ სითხეში, გრავიტაციული დალექვის პირობებში, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმის მატებასთან ერთად ნაწილაკების რაოდენობა ექსპონენციალურად იზრდება. იგივე დამოკიდებულებით ხდება მოლეკულების განაწილების კლება ჰაერის სვეტის სიმაღლის მატებასთან ერთად. ამიტომ, ნაწილაკების კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების გასაანგარიშებლად, პერენმა გამოიყენა გრავიტაციულ ველში მოლეკულების სიმაღლეზე განაწილების კანონი –  $\frac{c_{n_0}}{c_{n_h}} = \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right)$ . მრავალრიცხოვანი ცდების მეშვეობით დადგინდა ამ კანონის მართებულება მონოდისპერსიული, თხევადი, მცირე ზომის ნაწილაკების შემცველი სისტემებისთვისაც [6, 7, 8, 9, 10].

ბოლცმანის მუდმივას ტემპერატურაზე ნამრავლის ( $kT$ ), საშუალო კინეტიკური ენერჯის საშუალებით გამოსახვით,  $\frac{3}{2}kT = \overline{E_3}$ , ჰიფსომეტრული ფორმულა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{C_{n_0}}{C_{n_h}} = \exp\left(-\frac{3mgh}{2\bar{E}_3}\right), \quad (1)$$

სადაც  $C_{n_0}$  არის შეწონილი ნაწილაკების საწყისი რაოდენობრივი კონცენტრაცია;  $C_{n_h}$  – სიღრმეში შეწონილი ნაწილაკების რაოდენობრივი კონცენტრაცია;

$m$  – შეწონილი ნაწილაკების მასა, კგ;  $\bar{E}_3$  – ნაწილაკების საშუალო კინეტიკური ენერგია, ჯ:

$$\bar{E}_3 = \frac{m\bar{u}^2}{2}, \quad (2)$$

$\bar{u}$  – შეწონილი ნაწილაკების დალექვის საშუალო სიჩქარე, მ/წმ;  $h$  – ნაწილაკების დალექვის სიღრმე, მ.

გამოვსახოთ რაოდენობრივი კონცენტრაციები მოცულობითი კონცენტრაციების მეშვეობით:

$$C_{n_h} = \frac{C_{Vh}}{V_b}; \quad (3)$$

$$C_{n_0} = \frac{C_{V_0}}{V_b}, \quad (4)$$

სადაც  $C_{Vh}$  არის  $h$  სიღრმეში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია;  $C_{V_0}$  – შეწონილი ნაწილაკების საწყისი მოცულობითი კონცენტრაცია.

კინეტიკური ენერგიის სიდიდისა და (3, 4) განტოლებების გათვალისწინებით, გამოსახულება (1) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$C_{Vh} = C_{V_0} \exp\left(\frac{3gh}{\bar{u}^2}\right). \quad (5)$$

განტოლება (5) შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულებაა დალექვის სიღრმეზე.

ამ განტოლების გალოგარითმებით გამოვთვალოთ შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმე:

$$h = \frac{\bar{u}^2 \cdot \ln \frac{C_{Vh}}{C_{V_0}}}{3g}. \quad (6)$$

მიღებული (5, 6) დამოკიდებულებების გამოყენებით შესაძლებელია დავადგინოთ, რა კონცენტრაციის შემთხვევაში (ან რა სიღრმისას) გადადის ნაწილაკების დალექვა ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმიდან გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმში. ამისათვის, ორივე შემთხვევისთვის განვსაზღვროთ ნაწილაკზე მოქმედი წინაღობის ძალის სიდიდეები.

ჩამდინარე წყალში შეწონილი ნაწილაკების საწყისი რაოდენობა

$$n = \frac{C_{Vo}}{V_f} = \frac{6C_{Vo}}{\pi d^3}. \quad (7)$$

თავისუფალი დაღეჭვისას, ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენის დროს, სისტემის ყველა ნაწილაკზე მოქმედი წინაღობის ძალა  $F_{წიბ}^{\omega}$  გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$F_{წიბ}^{\omega} = n3\pi\mu u_{\omega} d = \frac{6C_{Vo}}{\pi d^3} \cdot 3\pi\mu u_{\omega} d = C_{Vo} \frac{18\mu u_{\omega}}{d^2}, \quad (8)$$

სადაც  $\mu$  არის სითხის დინამიკური სიბლანტე, პა·წმ;  $u_{\omega}$  - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო ლამინარული გარსშემოდენისას, მ/წმ.

კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად, ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად გაჩენილი დამატებითი წინაღობის ძალების გამო, ნაწილაკების გარსშემოდენა კარგავს ლამინარულ ხასიათს. ამ შემთხვევაში წინაღობის ძალა გამოითვლება ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინაღობის ფორმულით:

$$F_{წიბ}^{\delta} = c_d S \frac{\rho u_{\delta}^2}{2} = c_d \frac{\pi d^2 \rho u_{\delta}^2}{8}, \quad (9)$$

სადაც  $F_{წიბ}^{\delta}$  არის ნაწილაკზე მოქმედი წინაღობის ძალა გარდამავალი რეჟიმით გარსშემოდენისას;  $c_d$  - ნაწილაკზე მოქმედი წინაღობის კოეფიციენტი;  $u_{\delta}$  - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო გარდამავალი რეჟიმით გარსშემოდენისას, მ/წმ;  $S$  - სფეროსებრი ნაწილაკის მიდელის ფართობი, მ<sup>2</sup>:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (10)$$

ამგვარად, გარდამავალი რეჟიმით ნაწილაკების გარსშემოდენისას ყველა ნაწილაკზე მოქმედი წინაღობის ძალა იქნება:

$$F_{წიბ}^{\delta} = c_d \frac{\pi d^2 \rho u_{\delta}^2}{8} n' = c_d \frac{\pi d^2 \rho u_{\delta}^2}{8} \frac{6C_V}{\pi d^3} = c_d \frac{3\rho u_{\delta}^2}{4} \frac{C_V}{d}, \quad (11)$$

სადაც  $n'$  არის ნაწილაკების რაოდენობა გარდამავალ რეჟიმში;  $C_V$  - გარდამავალ რეჟიმში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია.

კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობად მივიჩნით ნაწილაკების ისეთი მოცულობითი კონცენტრაცია  $C'_V$ , რომლის დროსაც ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ რეჟიმებში გარსშემოდენისას წინაღობის ძალები ერთნაირია:

$$F_{წიბ}^{\omega} = F_{წიბ}^{\delta} \Rightarrow C_{Vo} \frac{18\mu u_{\omega}}{d^2} = c_d \frac{3\rho u_{\delta}^2}{4} \frac{C'_V}{d} \Rightarrow C'_V = C_{Vo} \frac{24\mu u_{\omega}}{c_d \rho u_{\delta}^2}. \quad (12)$$

განტოლება (12) ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობაა.

იმის დასადგენად, თუ რა ( $h_{\text{ზღ}}$ ) სიღრმეზე ხდება ნაწილაკების დაღეკვის ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის გადასვლა გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმში, (6) განტოლებაში ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობა გამოვსახოთ (12) განტოლების მეშვეობით:

$$h_{\text{ზღ}} = \frac{u^2}{3g} \cdot \ln \frac{24u_{\text{გ}}}{c_d \rho_s u_{\text{გ}}^2} \quad (13)$$

(13) განტოლებით განისაზღვრება, საღეკარში შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვისას, ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმზე გადასვლის სიღრმე.

### 3. დასკვნა

ამგვარად, ჩატარებული ანალიზის შედეგად მიღებულია დამოკიდებულებები, რომლებიც საშუალებას იძლევა შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვის სიღრმიდან გამომდინარე დავადგინოთ მათი მოცულობითი კონცენტრაცია, ასევე კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობა ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის და ამ კონცენტრაციისას შეწონილი ნაწილაკების დაღეკვის სიღრმე.

მიღებული დამოკიდებულებების გამოყენებით შესაძლებელია, ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის მიხედვით, დავადგინოთ, რომელ გარსშემოდენის რეჟიმში იღეკება შეწონილი ნაწილაკები და რომელი ფორმულით უნდა ვაწარმოოთ ნაწილაკებზე მოქმედი წინაღობის ძალისა და ჰიდრავლიკური სისხოს გაანგარიშება.

### ლიტერატურა

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 10-ое изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
2. Безруков Л. В. Физика: в 3 ч. Ч.1: Механика. Молекулярная физика. Новочеркасск: Гос. мелиор. акад., 2011. – 232 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва: Наука, 1974. – 714 с.
4. Иванов С.А. Газовая динамика. Самара. «Самарский ГТУ», 2014. – 61 с.

5. M. Jean Perrin. Brownian Movement And Molecular Reality. Translated from the Annales de chimie et de physique, 8me series, 1909, by F. Soddy. TaylorandFrancis. London. 1910. p.93.
6. Болдырев А.И. Физическая и коллоидная химия. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1983.– 408 с.
7. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: «Химия», 1975. –512 с.
8. Килимник Д. Ю., Разработка метода расчета скоростей седиментации частиц в полидисперсной суспензии: Дис.канд.техн. наук: 25.00.36: Санкт-Петербург, 2004. – 140 с.
9. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика. Издание второе, переработанное - М., 1976. – 480 с.
10. Brubacher L. An experiment to measure Avogadro’s constant. Repeating Jean Perrin’s confirmation of Einstein’s Brownian motion equation. Chem 13 news. May, 2006. pp 14-17.