

უკ 551.510.42.535.5

**ატმოსფეროში აეროზოლების გავრცელების და ნოტიო გამორეცხვის მათემატიკური მოდელების შესახებ**

ნ.ა.ბეგალიშვილი, გ. გელაძე, ნ.ნ. ბეგალიშვილი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტი

ნაშრომში განხილულია ატმოსფეროში არსებული აეროზოლური ნაწილაკების ნოტიო გამორეცხვის ამოცანა. ამისთვის მაქსიმალურად გამარტივებულია ამ პროცესის განხილვა იმისათვის, რომ მიღებულ იქნას შესაბამისი კოაგულაციის კინეტიკური განტოლების ანალიზური ამოხსნა.

როგორც ცნობილია [1,2], ატმოსფერული აეროზოლები განსხვავდებიან, როგორც ქიმიური შედგენილობით, ასევე ზომებით. იუნგეს კლასიფიკაციით კონდენსაციის (ჰიგროსკოპული) ბირთვების (აიტკენის ბირთვები) ზომების დიაპაზონია  $10^{-7}$ - $10^{-5}$  სმ ( $10^{-3}$ - $10^{-1}$  მკმ) რადიუსში.  $r = 10^{-5}$ - $10^{-4}$  სმ (0.1-1 მკმ) რადიუსიან ბირთვებს უწოდებენ დიდ აეროზოლურ ნაწილაკებს, ხოლო ბირთვებს ზომებით  $r \geq 1$  მკმ მიეკუთვნებიან გიგანტურ აეროზოლურ ნაწილაკებს. ტროპოსფეროს ქვედა ფენებში დედამიწის ზედაპირის მახლობლობაში აიტკენის ბირთვების კონცენტრაცია მერყეობს ინტერვალში  $10^4$ - $10^5$  სმ<sup>-3</sup>. მისი მინიმალური და მაქსიმალური სიდიდეები შეიძლება ერთი რიგით ნაკლები ან მეტი იყოს აღნიშნულ მნიშვნელობებზე. ზღვიური წარმოშობის დიდი აეროზოლური ნაწილაკების კონცენტრაცია შეადგენს 100-500 სმ<sup>-3</sup>, ხოლო კონტინენტური ტიპის ნაწილაკების – 500-3500 სმ<sup>-3</sup>. გიგანტური ჰიგროსკოპული ბირთვების კონცენტრაციაა 0.1-1 ლ<sup>-1</sup>, ანუ  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  სმ<sup>-3</sup>.

ნოტიო გამორეცხვაში მონაწილე ნისლის ან ღრუბლის წვეთების ზომების დიაპაზონია  $R=1-50$  მკმ, საშუალო რადიუსით,  $R_{საშ}=10-20$  მკმ. მათი კონცენტრაცია  $N=100-1000$  სმ<sup>-3</sup> რიგისაა. წვიმის წვეთების ზომებია  $R=100-2000$  მკმ (0.1-2 მმ), ხოლო კონცენტრაცია შეადგენს  $N=1-100$  მ<sup>-3</sup> ( $10^{-6}$ - $10^{-4}$  სმ<sup>-3</sup>).

ნოტიო გამორეცხვაში შეიძლება მონაწილეობდეს მყარი ფრაქცია: ყინულის კრისტალები ( $R=1-100$  მკმ), ხორხოშელა ( $R=100-500$  მკმ), სეტყვის ნაწილაკები ( $R=0.5$ სმ-5სმ). მათი კონცენტრაცია შეესაბამება, ერთის მხრივ, ნისლებისა და ღრუბლების წვეთების კონცენტრაციას, მეორეს მხრივ, მსხვილი წვეთების კონცენტრაციას წვიმებში.

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ როგორც წესი, აეროზოლის ზომები ბევრად ნაკლებია წვეთების და კრისტალების ზომებზე:  $r \ll R$ , ხოლო კონცენტრაციები თანაზომადია  $N \approx N_0$ , ან  $N \gg N_0$ .

ეს განაპირობებს ნოტიო გამორეცხვის საკმაოდ მაღალ ინტენსივობას, ხოლო ერთმა წვეთმა შეიძლება განიცადოს რამდენიმე დაჯახება აეროზოლურ ნაწილაკებთან და შემოიერთოს ისინი.

განვიხილოთ სივრცულად ერთგვაროვანი დისპერსული სისტემა, რომელიც შედგება აეროზოლური ნაწილაკებისა და წვეთებისგან (კრისტალებისგან) და რომელშიც მიმდინარეობს კოაგულაციის პროცესი – ნაწილაკები ეჯახებიან წვეთებს (კრისტალებს) და ერწყმიან მათ. მივიღოთ, რომ:

- ერთი წვეთის მიერ ნაწილაკების მიტაცება არ არის დამოკიდებული სხვა მეზობელი წვეთების არსებობაზე;
- ყოველი ნაწილაკის ჩატაცების ალბათობა არ არის დამოკიდებული იმაზე, თუ რამდენ ნაწილაკს დაეჯახა მანამდე წვეთი და შემოიერთა ისინი;
- დისპერსულ სისტემაში მოქმედებს აეროზოლების წყარო, რომელიც პროპორციულია ნაწილაკთა საწყისი განაწილებისა;
- წვეთების განაწილებას შეესაბამება მონოდისპერსული სპექტრი.

მაშინ კოაგულაციის კინეტიკური განტოლება შეიძლება შემდეგი სახით წარმოვადგინოთ:

$$\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = - \sigma N_0 n(r,t) + A n_0, \quad (1)$$

სადაც  $n(r,t)$  – აეროზოლის განაწილების ფუნქციაა რადიუსების მიხედვით.  $n_0 = n(r,0)$  – ნაწილაკთა საწყისი სპექტრია,  $A$  – პროპორციულობის კოეფიციენტი,

$$N_0 = \int_0^{\infty} f(R) dR = \int_0^{\infty} \delta(R - R_0) dR = N_{R=R_0}$$

წვეთების კონცენტრაციაა,  $f(R)$  – წვეთების განაწილების (სპექტრი) რადიუსების მიხედვით,  $t$  – დრო, ხოლო  $\sigma$  – დაჯახების (კოაგულაციის) ალბათობა. იგი მოიცემა შემდეგი გამოსახულებით:

$$\sigma = \iint_0^{\infty} \sigma(r,R) n_0(r,0) f(R) dr dR. \quad (2)$$

$$\text{აქ } \sigma = (r, R) = \pi(R + r)^2 \Delta V \varepsilon(r, R), \quad (3)$$

სადაც  $\Delta V = V_R - V_r$  – წვეთის და ნაწილაკის ვარდნის სიჩქარეთა სხვაობა ანუ მათი დაახლოვების ფარდობითი სიჩქარე,  $\varepsilon(r, R)$  - მიტაცების კოეფიციენტია.

(1) განტოლების ანალიზური ამოხსნა მოიცემა შემდეგი გამოსახულებებით:

$$n(r, t) = n_0 e^{-\sigma N_0 t + \frac{A n_0}{\sigma N_0} (1 - e^{-\sigma N_0 t})}. \quad (4)$$

ასეთივე ტიპის გამოსახულებები მიიღება აეროზოლის კონცენტრაციისათვის  $N(t)$  და ჯამური მასისათვის  $M(t)$ .

(4)-დან გამომდინარეობს, რომ თუ  $t \rightarrow 0$ , მაშინ  $n(r, t) \rightarrow n_0(r, 0)$ . დიდი დროებისთვის, როცა  $t \rightarrow \infty$ ,

$$n(r, t) \rightarrow \frac{A n_0}{\sigma N_0}.$$

ეს ნიშნავს, რომ დასაწყისში არსებული ყველა ნაწილაკი ჩაიტაცება (გამორეცხება) წვეთების მიერ და საბოლოოდ დარჩება ნაწილაკები კონცენტრაციით  $\frac{A n_0}{\sigma N_0}$ . ანუ წყაროს მოქმედების შედეგად სისტემაში შემოსული ნაწილაკების  $A n_0$  კონცენტრაცია  $\sigma N_0$  -ჯერ მცირდება იმის გამო, რომ ისინი  $\sigma$  ალბათობით ეჯახებიან  $N_0$  რაოდენობის წვეთებს.

თუ დისპერსიულ სისტემაში წყარო არ მოქმედებს, ე.ი.  $A=0$ , მაშინ

$$n(r, t) = n_0 e^{-\sigma N_0 t} = n_0 e^{-t/\tau}.$$

აქ  $\tau = \frac{1}{\sigma N_0}$  – აეროზოლური ნაწილაკების არსებობის დროა (რელაქსაციის დრო). როგორც ვხედავთ ამ დროში

ნაწილაკთა საწყისი კონცენტრაცია  $e$ -ჯერ მცირდება [1].

შევაფასოთ  $\tau^{-1} = \sigma N_0$  ნაწილაკებისა და წვეთების სხვადასხვა ზომებისათვის და მივიღოთ ნოტიო გამორეცხვის მიკროფიზიკური კანონები [3]. დაჯახების ალბათობა განპირობებულია გრავიტაციული კოაგულაციით (სედიმენტაცია), ნაწილაკთა ინერციით, მათი წამოღება – წატაცებით, ბროუნის დიფუზიით.

$$1. \quad R_0 \leq 50 \text{ მკმ}, \quad 0.1 \leq r \leq 1 \text{ მკმ}. \tau^{-1} = \sigma N_0 \approx \pi R_0^2 a R_0^2 \varepsilon_0 \left( \frac{R_0 a R_0^2}{\gamma} \right)^{-\frac{2}{3}} N_0 \approx N_0 R_0^2.$$

$r \leq 1$  მკმ დიდი ზომების მქონე ნაწილაკების ნისლისა და ღრუბლების წვეთებით გამორეცხვის ინტენსივობა პროპორციულია წვეთების ზედაპირთა ფართობების ჯამისა.

$$2. \quad R_0 \leq 50 \text{ მკმ}, \quad 0.01 \leq r \leq 0.1 \text{ მკმ}. \tau^{-1} \approx \pi R_0^2 a R_0^2 N_0 \frac{4D}{a R_0^3} \approx N_0 R_0.$$

მცირე ზომის აიტკენის ბირთვების მიმართ ნისლისა და ღრუბლის წვეთების გამორეცხვის ქმედება პროპორციულია ყველა წვეთების რადიუსების ჯამისა.

$$3. \quad R_0 > 50 \text{ მკმ}, \quad 0.01 \leq r \leq 0.1 \text{ მკმ}. \tau^{-1} \approx \pi R_0^2 b R_0 N_0 \frac{4 \frac{s k T \lambda}{\pi(\pi + \varepsilon) \eta r^2}}{R_0 b R_0} \approx N_0 R_0 r^2.$$

მცირე ზომის აეროზოლური ნაწილაკების წვიმის წვეთებით გამორეცხვის ეფექტურობა პროპორციულია წვეთების რადიუსების ჯამისა და უკუპროპორციულია ნაწილაკთა ზედაპირების ფართობისა.

4. როგორც ვხედავთ, რელაქსაციის დრო მაქსიმალურია  $0.1 \leq r \leq 1$  მკმ ზომის აეროზოლური ნაწილაკებისათვის. ეს მოვლენა განსაზღვრავს ატმოსფეროში ბუნებრივ პირობებში მოქმედ ნოტიო გამორეცხვის მინიმუმს. ამ ინტერვალში დაიკვირვება მაქსიმუმი ნაწილაკთა განაწილებაში [1,2].

მიღებული ნოტიო გამორეცხვის 1-4 მიკროფიზიკური კანონებიდან გამომდინარეობს, რომ, წვეთების ზომების მატებისას მათი გამორეცხვის ეფექტურობის მკვეთრი ზრდის მიუხედავად, ნისლებისა და ღრუბლების გამორეცხვის მოქმედება უფრო მაღალია, ვიდრე ნალექებისა. ეს აიხსნება იმით, რომ წვიმაში წვეთების კონცენტრაცია 5-6 რიგით უფრო ნაკლებია, ვიდრე ნისლებში და ღრუბლებში.

ქვემოთ მოცემულია აეროზოლური ნაწილაკების არსებობის (რელაქსაციის) საშუალო დრო, რომლის მიხედვით შეიძლება შეფასდეს მათი ნოტიო გამორეცხვის ეფექტურობა განხილული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე.

მოვლენა	წვეთების ზომა R <sub>0</sub> მკმ	ნაწილაკის არსებობის (რელაქსაციის) დრო τ სთ
ნისლი, ღრუბელი	50	0.5
ჟინჯული	200	0.6
სუსტი წვიმა	500	0.8
ზომიერი წვიმა	1000	0.9
ძლიერი წვიმა	1500	1.5

#### ლიტერატურა-REFERENCES-ЛИТЕРАТУРА

- 1.Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1976, 640с.
- 2.Облака и облачная атмосфера. Справочник под редакций И.П.Мазина и А.Х. Чршана. Л., Гидрометеиздат, 1989, 648с.
- 3.Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. Л., Гидрометеиздат, 1975, 320с.

უაკ 551.510.42.535.5

**ატმოსფეროში აეროზოლების გავრცელების და ნოტიო გამორეცხვის მათემატიკური მოდელების შესახებ/** ბეგალიშვილი ნ.ა., გელაძე გ., ბეგალიშვილი ნ.ნ./საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ჰიდრომეტეოროლოგიის ინსტიტუტის შრომათა კრებული-2014.-ტ.120.-გვ.89-92 -ქართ., რეზ. ქართ., ინგლ., რუს.

განხილულია ატმოსფეროში არსებული აეროზოლური ნაწილაკების ნოტიო გამორეცხვის პროცესი. სივრცულად ერთგვაროვანი დისპერსულ სისტემისათვის, რომელიც შედგება აეროზოლური ნაწილაკებისა და წვეთებისაგან (კრისტალებისაგან), მიღებულია კოაგულაციის კინეტიკური განტოლების ანალიზური ამოხსნა აეროზოლების მუდმივი წყაროს მოქმედების პირობებში. წყარო პროპორციულია ნაწილაკთა საწყისი განაწილებისა. ამოხსნის საფუძველზე შეფასებულია ნოტიო გამორეცხვის ეფექტურობა სხვადასხვა ტიპის თხევადი ნალექებისათვის (აეროზოლურ ნაწილაკთა რელაქსაციის დრო). მიღებულია, ასევე ნოტიო გამორეცხვის მიკროფიზიკური კანონები გრავიტაციული კოაგულაციის შემთხვევაში.

UDK. 551.510.42.535.5

**ON THE MATHEMATICAL MODELS OF TRANSFER AND WET WASHING DOWN OF AEROSOL IN THE ATMOSPHERE/** Begalishvili N.A., Geladze G., Begalishvili N.N./ Transactions of the Institute of Hydrometeorology of Georgian Technical University. -2014, t.120. , pp.89-92 - Georgia, Summary, Geo., Eng., Rus.

The process of wet washing down of aerosol particles in the atmosphere is examined. For the specially homogenous dispersive system containing aerosol particles and droplets (crystals), the analytic solution of coagulation kinetic equation is obtained under the conditions of constant generation of aerosol. The source is proportional to the initial distribution of particles. Using the solution the efficiency of wet washing down is assessed for different types of liquid precipitation (the relaxation time of aerosol particles). Microphysical laws of wet washing down in case of gravity coagulation are obtained as well.

УДК 551.510.42.535.5

**О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВЛАЖНОГО ВЫМЫВАНИЯ АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ/** Бегалишвили Н.А., Геладзе Г., Бегалишвили Н.Н./ Сб. Трудов Института Гидрометеорологии Грузинского Технического Университета. -2014.- т. 120 .-с.89-92 -Груз., Рез. Груз., Англ., Рус.

Рассмотрен процесс влажного вымывания аэрозольных частиц в атмосфере. Для пространственно однородной дисперсной системы, состоящей из аэрозольных частиц и капель (кристаллов), получено аналитическое решение кинетического уравнения коагуляции в условиях действия постоянного источника аэрозоля. Источник пропорционален начальному распределению частиц. На основе решения выполнены оценки эффективности влажного вымывания для разного типа жидких осадков (время релаксации аэрозольных частиц). Получены, также, микрофизические законы влажного вымывания в случае гравитационной коагуляции.