

სურსათმცოდნეობა

**ხაჭოს შრატის დემინერალიზაცია და ნეიტრალიზაცია
ნანოფილტრაციის პროცესში**

შოთა რუხაძე

shota.rukhade@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ქუთაისი, საქართველო

ლეონიდ ტოლმაჩვი

მემბრანული ტექნოლოგიის საექციო საზოგადოება
კლაიპედა, ლიეტუვა

მარიტა რუხაძე

თბილისის სახელმწიფო სამედიცინო უნივერსიტეტი
თბილისი, საქართველო

მეგი აფრიდონიძე

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ქუთაისი, საქართველო

აბოს ნურმუხამედოვი

ტაშკენტის ქიმიურ-ტექნოლოგიური ინსტიტუტი
ტაშკენტი, უზბეკეთი

რძის პროდუქტების ღირებულების შესამცირებლად და რძის შრატის არასწორი უტილიზაციით, გამოწვეული ეკოლოგიური ზიანის გამოსარიცხად საჭიროა უზრუნველყოთ მისი 100 % გადამუშავება მოწინავე ინოვაციური ტექნოლოგიით. არსებული ტექნოლოგიით ლაქტოზის წარმოების დროს ყველაზე მეტ პრობლემას ქმნის მჟავე შრატის გადამუშავება. ამიტომ ასეთ შრატს სჭირდება დამატებითი დამუშავება. პირველ რიგში აუცილებელია ნაწილობრივი დემინერალიზაცია და მჟავიანობის შემცირება. თანამედროვე პირობებში რძის საწარმოებში მჟავიანობის შემცირება ხორციელდება ტუტე რეაგენტის დამატებით. ტუტის შეტანა უარყოფითად მოქმედებს მიღებული პროდუქტის ხარისხობრივ მაჩვენებლებზე. რძის შრატის ტუტით დამუშავების ალტერნატივად შეიძლება გამოყენებულ იქნას ელექტროდიალიზი ბიპოლარული მემბრანების გამოყენებით. ინოვაციური ტექნოლოგია წარმოადგენს კლასიკური და ბიპოლარული ელექტროდიალიზების შერწყმას. მჟავე შრატის დემინერალიზაცია და მჟავიანობის კორექტირება მოხდება დამატებითი რეაგენტების გამოყენების გარეშე. ელექტროდიალიზით დამუშავებამდე რძის შრატის ნაწილობრივი დემინერალიზაციისათვის (35%-მდე), აგრეთვე, ბუფერული მოცულობის (4-ჯერ) და მჟავიანობის (30%-მდე) შესამცირებლად, ვახდენთ რძის შრატის ნანოფილტრაციას.

საკვანძო სიტყვები: დემინერალიზაცია, მჟავიანობის შემცირება, რძის შრატი, ნანოფილტრაცია, მემბრანა.

განსაკუთრებულ პრაქტიკულ ინტერესს ნანოფილტრაცია (ნფ) წარმოადგენს, როგორც ხერხი ხაჭოს შრატის ერთდროული დემინერალიზაციით და ნეიტრალიზაციით. ნფ კონცენტრატების წარმოებაში შემდგომი გამოყენებისათვის პროცესის წარმართვის ოპტიმალურ ვარიანტს წარმოადგენს შრატიდან მინერალური მარილებისა და რძის მჟავას მაქსიმალური მოცილება, ბიოლოგიურად ღირებული კომპონენტების - ცილების და ლაქტოზას მეტად სრულად შენარჩუნების დროს (რუხაძე ... 2019).

გამოყენებული მემბრანების სელექციურობა შეიძლება შევაფასოთ ფილტრატში გადასული სხვადასხვა კომპონენტების რაოდენობით. კვლევა ჩავატარეთ შრატზე ტიტრული სიმჟავით 68°T და $\text{PH} = 4,65$, მიღებული ხაჭოს მჟავური მეთოდით წარმოების დროს.

შრატი (40 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ ტემპერატურაზე განიცდიდა კონცენტრირებას პლოტურ დანადგარზე КПИ-1 მწარმოებლობით 60 ლ/სთ, რომელიც აღჭურვილი იყო მემბრანებით УПМ და ფართით 2მ^2 . კონცენტრირებას ვახდენთ დანადგარში მისი ცირკულაციით 40 წთ განმავლობაში. საწყის შრატში და ნფ-კონცენტრატში, მიღებული მოცულობითი შეკუმშვის კოეფიციენტის N სხვადასხვა ფაქტორზე, ვსაზღვრავდით ყველა ძირითად და ცალკეულ მინორულ კომპონენტებს (ცხრილი1).

ცხრილი 1. მოცულობით კონცენტრირების სხვადასხვა ფაქტორის დროს ხაჭოს შრატის ნფ-კონცენტრატების ექსპერიმენტალური ნიმუშების შემადგენლობა

მაჩვენებლების დასახელება	საწყისი შრატი	მასური წილი N-ჯერ კონცენტრირებისას, %					
		1,5	2	2,5	3	3,5	4
მშრალი ნივთიერებები	5,85	8,21	11,36	13,02	14,05	18,72	20,83
ლაქტოზა	2,88	4,43	6,50	7,59	8,28	13,35	14,73
ცილა	0,70	0,95	1,28	1,44	1,54	2,03	2,14
არაცილოვანი აზოტი	0,057	0,072	0,092	0,099	0,103	0,132	0,142
ორგანული მჟავები	0,68	0,84	1,10	1,12	1,17	1,56	1,72
ნაცარი	0,70	0,85	1,06	1,07	1,12	1,52	1,67

მიღებული შედეგები შემადგენლობით საშუალებას გვაძლევს გავიანგარიშოთ ამა თუ იმ კომპონენტის დანაკარგი (ფილტრატში გადასვლის ხარისხი) ხაჭოს შრატის ნფ-დამუშავების პროცესში. ამ პარამეტრის განსაზღვრული ფორმულის გამოყვანა დაფუძნებულია

მატერიალური ბალანსის პრინციპის გამოყენებაზე (რუხაძე ... 2013).
 თუ i -ური კომპონენტი საწყის ნედლეულში ტოლია M_{oi} , ხოლო საბოლოოში M_{ki} , მაშინ ამ კომპონენტების დანაკარგები Π_i პროცენტული თანაფარდობით განისაზღვრება ფორმულით:

$$\Pi_i = \frac{M_{oi}-M_{ki}}{M_{oi}} * 100\% \quad (1)$$

თუ გამოვსახავთ i -ური კომპონენტის რაოდენობას მოცულობის კონცენტრაციაზე ნამრავლით, მივიღებთ:

$$M_{oi} = V_o * C_{oi} \quad (2)$$

$$M_{ki} = V_k * C_{ki} \quad (3)$$

სადაც V_o და V_k - ნედლეულის საწყისი და საბოლოო მოცულობები, მ³;
 C_{oi} და C_{ki} -ნედლეულში i -ური კომპონენტის საწყისი და საბოლოო კონცენტრაცია, კგ/მ³.

ჩასმით მივიღებთ

$$\Pi_i = \left(1 - \frac{V_k C_{ki}}{V_o C_{oi}}\right) * 100\% = \left(1 - \frac{V_{ki}}{C_{oi} * N}\right) * 100\% \quad (4)$$

სადაც N მოცულობითი შეკუმშვის კოეფიციენტი:

$$N = \frac{V_o}{V} \quad (5)$$

სადაც V_o -შრატის საწყისი მოცულობა მ³;

N - კონცენტრატის მოცულობა, მ³.

ფორმულით გაანგარიშებული და ცხრილში 2 მოცემული მონაცემები მოწმობენ იმაზე, რომ ხაჭოს შრატის ნფ-დამუშავების დროს ძირითადი დანაკარგები მოდის ნაცარზე (მინერალური მარილები) და არა ცილოვანი აზოტზე (დაბალმოლეკულური ფრაქციები თავისუფალი ამინომჟავები, შარდოვანა და ა.შ;

ცხრილი 2. ხაჭოს შრატის კომპონენტების დანაკარგები ნფ დამუშავების შემდეგ

კომპონენტის დასახელება	დანაკარგები, %
მშრალი ნივთიერებები	8,42
ლაქტოზა	9,07
ცილა	12,95
არაცილოვანი აზოტი	30,39
ორგანული მჟავები	34,52
ნაცარი	37,72
ნატრიუმი	37,86
ქლორი	49,85
კალიუმი	43,55
კალციუმი, ფოსფორი, მაგნიუმი საშუალოდ	10,00

კათიონებიდან მეტად ეფექტურად სცილდებიან კალიუმი და მაგნიუმი. უფრო მაღალი ვალენტობის კათიონების გამოკვლევაგ გვიჩვენა რომ ხაჟოს შრატის ნფ-დამუშავების დროს ისინი ფაქტიურად არ სცილდებიან. მოცილების ყველაზე მაღალი ხარისხი აქვს ქლორის ანიონს. მოცემული ეფექტი აიხსნება იმით, რომ ქლორის ანიონი ერთდროულად შედის KCl და NaCl მოლეკულებში, უზრუნველყოფს რა ჯამური ელექტრომუხტის ნულთან ტოლობას ნფ-მემბრანების ორივე მხარეს (Roman ... 2009).

ნანოფილტრაციის დროს შრატიდან დაბალმოლეკულური ნივთიერებების მოცილების პროცესი აღიწერება განტოლებით (Свитцов ... 2007):

$$\frac{C_{\text{ფ}}}{C_{\text{კ}}} = K \quad (6)$$

სადაც $C_{\text{ფ}}$ -ფილტრარშიკომპონენტის კონცენტრაციაა; $C_{\text{კ}}$ -კონცენტრატში კომპონენტის კონცენტრაცია; K - გაყოფის კოეფიციენტი, რომელიც არის მემბრანის მახასიათებელი.

ნფ-დამუშავების დროს შრატში ნივთიერებების მატერიალური ბალანსი შეიძლება აღწეროთ შემდეგი განტოლებით

$$d(CV) = -C_{\text{ფ}} * dV_{\text{ფ}} = KCdV \quad (7)$$

სადაც C - შრატში ნივთიერებათა კონცენტრაცია;

$C_{\text{ფ}}$ - ფილტრატში ნივთიერებათა კონცენტრაცია;

V - კონცენტრატის მოცულობა;

$V_{\text{ფ}}$ - ფილტრატის მოცულობა;

V და $V_{\text{ფ}}$ დაკავშირებული არიან თანაფარდობით

$$V = V_0 - V_{\text{ფ}} \quad (8)$$

სადაც V_0 - შრატის საწყისი რაოდენობა.

ამოვხსნათ განტოლება

$$d(CV) = cdv + vdc = kcdV$$

$$\frac{dC}{C} = -(1 - k) \frac{dV}{V}$$

$$\ln C = \ln V^{-(1-k)} + \text{const}$$

დროის საწყის მომენტში $C=C_0$ და $V=V_0$ შესაბამისად

$$\text{const} = \ln C_0 V_0^{1-k}$$

საბოლოოდ

$$C = C_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1-k} \quad (9)$$

დაბალმოლეკულური ნივთიერებების მოცილების ხარისხი განისაზღვრება დამოკიდებულებიდან (Евдокимов ... 2009, Rukhadze ... 2018):

$$D = \frac{\left(\frac{C_0}{m_0} \frac{C}{m} \right)}{\frac{C_0}{m_0}} \quad (10)$$

სადაც D - მოცილების ხარისხი;

m_0 - მშრალი ნივთიერებების მასური წილი საწყის მომენტში;

m - მშრალი ნივთიერებების მასური წილი მიმდინარე მომენტში.

ჩასმით მივიღებთ

$$D = 1 - \frac{m_0}{m} \left(\frac{v_0}{v} \right)^{1-k} \quad (11)$$

ნანოფილტრაციის დროს ამ პროცესისათვის საერთოდ მიღებულ მშრალ ნივთიერებების კონცენტრაციამდე (18-20%) მოცულობითი შეკუმშვა N_v პრაქტიკულად ემთხვევა მშრალი ნივთიერებების მასური წილის გაზრდის ჯერადობას (СВИТЦОВ ... 2007).

$$N_m \approx \frac{m}{m_0} \quad (12)$$

შესაბამისად

$$N \approx N_v \approx N_m$$

განტოლება მიიღებს სახეს

$$D \approx 1 - N^{-k} \approx 1 - \frac{1}{N^k} \quad (13)$$

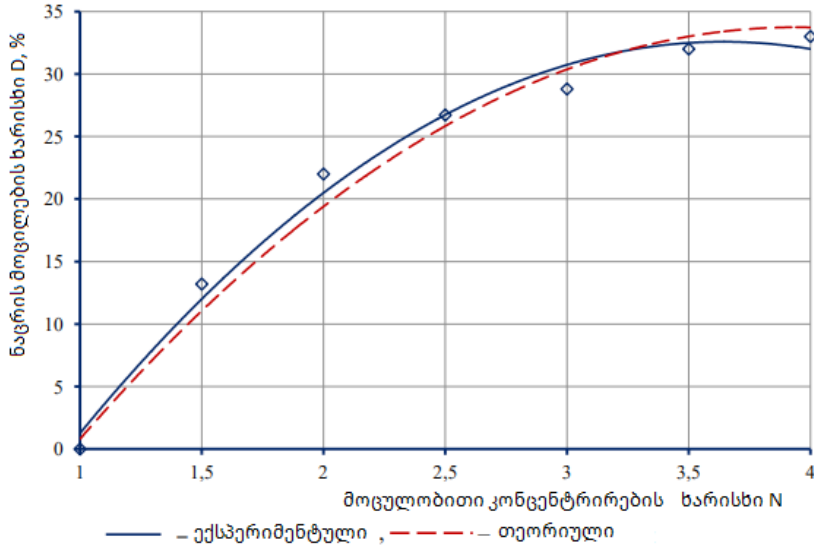
ამ გამოსახულების ექსპერიმენტული მონაცემებით შესამოწმებლად კონცენტრირების სხვადასხვა ხარისხისათვის ფორმულით ვსაზღვრავდით D ნაცრისათვის და რძის მჟავისათვის. გაანგარიშების შედეგებს ვიყენებდით ექსპერიმენტული გრაფიკული დამოკიდებულებების ასაგებად $D = f(N)$ უმცირესი კვადრატების მეთოდით (ნახ. 1, 2)

კონცენტრირების ხარისხის დროს $N=3,0$ კონცენტრატთან ერთად ვიღებდით ფილტრატის ნიმუშს, რომელშიც ვსაზღვრავდით ნაცრისა და რძის მჟავას მასურ წილს. ფილტრატისა და კონცენტრატის შემადგენლობის მონაცემებით ფორმულით (6) ვსაზღვრავდით გაყოფის კოეფიციენტს K (იხ. ცხრ. 3.)

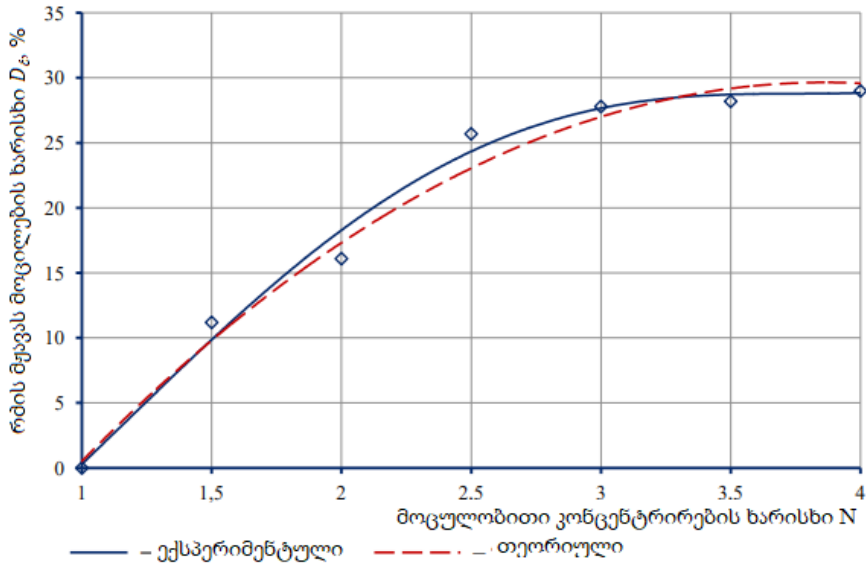
ცხრილი 3. ნანოფილტრაციით ხაჭოს შრატის გაყოფის პროდუქტებში კომპონენტების შემცველობა

კომპონენტი	მასური წილი, %		
	ს ა წ ყ ი ს ი შრეტი	ნფ - კონცენტრეტი, ϵ_A	ნფ - ფილტრეტი, ϵ_B
ნაცარი	0,65	1,40	0,4555
რძის მჟავა	0,61	1,41	0,3901

K -ს მნიშვნელობას ვიყენებდით დემინერალიზაციის ხარისხის და რძის მჟავას მოცილების D გასაანგარიშებლად, მოცულობითი კონცენტრირების ხარისხის მიხედვით ფორმულით 13. თეორიული და ექსპერიმენტული დამოკიდებულებები $D = f(N)$, $N=1 \div 4$ დიაპაზონში გრაფიკულად. მოც. ნახ. 1 და 2.



ნახაზი 1. ნანოფილტრაციტ ხაჭოს შრატის კონცენტრირების დროს დემინერალიზაციის ხარისხის თეორიული და ექსპერიმენტალური დამოკიდებულება მოცულობითი კონცენტრირების ფაქტორისაგან.



ნახაზი 2. ნანოფილტრაციტ ხაჭოს შრატის კონცენტრირების დროს რძის მჟავას მოცილების ხარისხის თეორიული და ექსპერიმენტალური დამოკიდებულება მოცულობითი კონცენტრირების ფაქტორისაგან.

გამოკვლევული კომპონენტებისთვის მოცულობითი კონცენტრირების ფაქტორის გაზრდით D-ს მნიშვნელობა იზრდება. ნაცრისათვის D-ს აბსოლიტური მნიშვნელობა მეტია, ვიდრე რძის მჟავასათვის. მრუდების მაქსიმალური აღმასვლა შეიმჩნევა N-ის 3-მდე მნიშვნელობის დროს, რის შემდეგაც კომპონენტების მოცულობა მცირდება. 3,5 მეტი მოცულობითი კონცენტრირების დროს D მნიშვნელობა პრაქტიკულად არ იცვლება. ეს დაკავშირებულია კონცენტრირებულ ხსნარში ოსმოსური წნევის გაზრდასთან, აგრეთვე მემბრანის ზედაპირზე ლაბისმაგვარი ცილოვანი ფენის წამოქმნასთან, რაც ამცირებს დანადგარის მწარმოებლობას (Suarez ... 2006). ნანოფილტრაციის ნორმალური რეჟიმით ჩატარების დროს N=3,5, დემინერალიზაციის ხარისხი შეადგენს 33% და რძის მჟავას მოცილების დონე 28%.

მიღებული განტოლების ადეკვატურობის შემოწმება მოხდა ფიშერის კრიტერიუმის დახმარებით. გაანგარიშებისათვის შუალედური მონაცემები წარმოადგენილია ცხრილებში 4 და 5.

ცხრილი 4. ნფ-პროცესში ხაჭოს შრატის დემინერალიზაციის ხარისხის მონაცემები მიღებული გაანგარიშებით და ექსპერიმენტით

ცდის №	$y_{iგაანგ.}$	$y_{iექპ}$	$(y_{iგაანგ.} - y_{iექპ})^2$	$(y_i - y_{iგაანგ.})^2$
1	12,20	13,2	182,25	1
2	20,00	22	32,49	4
3	25,00	26,72	0,49	2,9584
4	30,00	28,8	18,49	1,44
5	33,00	32,42	53,29	0,3364
6	34,00	33,76	68,89	0,0576
	$y_{საშუაგანგ.} = 25,70$		ჯამი 355,90	ჯამი 9,79

ფიშერის კრიტერიუმი განისაზღვრება ფორმულით (Проверка адекватности 2021):

$$F = \frac{\sum(y_{iგაანგ.} - y_{iსაშუაგანგ.})^2}{m} * \frac{n-m-1}{\sum(y_i - y_{iგაანგ.})^2} \quad (14)$$

სადაც m - ფაქტორების რიცხვი, m=1;

$$F = \frac{355,9}{1} * \frac{6 - 1 - 1}{9,79} = 145,41$$

ფიშერის კრიტერიუმების ცხრილური მონაცემები შესაძლოა ალბათობით $\alpha = 0,95$ შეადგენს 6,94. ვინაიდან $F_{გაანგ.} > F_{ცნრ.}$ ($145,41 > 6,94$; $80,24 > 6,94$), შესაბამისად განტოლება

ადეკვატურად აღწერს დემინერალიზაციის და რძის მჟავას მოცილების პროცესებს ხაჰოს შრატის ნფ-პროცესში.

ცხრილი 5. ნფ-პროცესში ხაჰოს შრატის დემინერალიზაციის ხარისხის მონაცემები მიღებული გაანგარიშებით და ექსპერიმენტით

ცდის №	$y_{iგაანგ.}$	$y_{iექპ}$	$(y_{iგაანგ.} - y_{iგაანგ.})^2$	$(y_i - y_{iგაანგ.})^2$
1	10,54	11,2	182,25	1
2	17,34	16,1	32,49	4
3	23,00	25,7	0,49	2,9584
4	26,05	27,8	18,49	1,44
5	29,12	28,2	53,29	0,3364
6	29,92	29	68,89	0,0576
	$y_{საშუაგაგ.} = 22,66$		ჯამი 281,24	ჯამი 14,01

$$F = \frac{281,24}{1} * \frac{6 - 1 - 1}{14,01} = 80,24$$

გამოყოფილი ანალიზური გამოსახულება (13) საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ ნფ-პროცესში ხაჰოს შრატის დემინერალიზაციის დონე და რძის მჟავას მოცილების ხარისხი. ამისათვის შემოთავაზებულია გამოვიყენოთ შემდეგი ალგორითმი:

K კოეფიციენტის განსაზღვრა

მინერალური ნივთიერებებისათვის k შეიძლება განვსაზღვროთ ფილტრატის და კონცენტრატის კუთრი ელექტროგამტარებლობით ნფ-დამუშავების საწყის მომენტში, როცა მშრალი ნივთიერებების კონცენტრაცია მასში მცირეა და დასაშვებია გამოვიყენოთ თანაფარდობა:

$$C_{ფ} = k * \sigma_{ფ} \quad C_{გ} = k * \sigma_{გ} \quad (15)$$

სადაც $C_{გ}$ - ნაცრის მასური წილი შრატში;

$C_{ფ}$ - ნაცრის მასური წილი ფილტრატში.

$\sigma_{გ}$ - შრატის კუთრი ელ. გამტარობა;

$\sigma_{ფ}$ - ფილტრატის კუთრი ელ. გამტარობა.

k - პროპორციულობის კოეფიციენტი

(15) დან
$$\frac{C_{ფ}}{C_{გ}} = \frac{\sigma_{ფ}}{\sigma_{გ}} = k_{მინ} \quad (16)$$

1. პროცესის დამთავრების შემდეგ, აფიქსირებენ მიღებული კონცენტრატის მოცულობას და შრატში და კონცენტრატში რეფრაქტომეტრული მეთოდით საზღვრავენ მშრალი ნივთიერებების მასურ წილს, რომლითაც ფომულით (12) ანგარიშობენ მშრალი

ნივთიერებების მასური წილის გაზრდის ჯერადობას N_m .

2. ფორმულით (13) საზღვრავენ დემინერალიზაციის დონეს D.

რძის შრატის კონცენტრაცია შეიძლება განვსაზღვროთ თანაფარდობით (Тепел ...2012):

$$C_{რ.შ} = 0,092 * T \quad (17)$$

$$\frac{C_{შრშ}}{C_{გრშ}} = \frac{T_{შ}}{T_{გ}} = k_{რშ} \quad (18)$$

სადაც $C_{შრშ}$ და $C_{გრშ}$ -რძის მჟავას კონცენტრაციაა ფილტრატში და კონცენტრატში შესაბამისად $T_{შ}$ და $T_{გ}$ - ტიტრული მჟავიანობა ფილტრატსა და კონცენტრატში.

მაშასადამე, ჩატარებული კვლევები გვიჩვენებენ, რომ ხაჭოს შრატის ნანოფილტრაციით დამუშავების დროს მუშა მნიშვნელობამდე $N=3,5$ შეიძლება მივაღწიოთ დემინერალიზაციის დონეს (32-34%) და ნეიტრალიზაციის (25-28%). გამოყვანილი ანალიზური გამოსახულება (13) ადეკვატურად აღწერს ხაჭოს შრატის ნანოფილტრაციის დროს დენიმერალიზაციის და ნეიტრალიზაციის პროცესებს, მოცულობითი კონცენტრირების ფაქტორისაგან დამოკიდებულებით და შეიძლება მისი რეკომენდაცია საწარმოო პირობებში ამ პარამეტრების ოპერატიული განსაზღვრისთვის.

ლიტერატურა

რუხაძე, შ.შ. თვალჭრელიძე, ა.კ. აფრიდონიძე, მ.დ. 2013. "ელექტრომემბრანული აპარატის არხებში გაყოფის პროცესის მათემატიკური მოდელი", კოლოიდურ ქიმიაში და ფიზიკო-ქიმიურ მექანიკაში IV საერთაშორისო კონფერენციის შრომების კრებული. მოსკოვი, რუსეთი, 2013;

რუხაძე, შ. ტოლმაჩევი, ვ. აფრიდონიძე, მ. ხეცურიანი, გ. 2019. „ხაჭოს შრატის დემინერალიზაცია და ნეიტრალიზაცია ნანოფილტრაციის პროცესში“. აწსუ მოამბე, #2 (14), 2019: 35-44.

Suarez, E. 2006. „Partial demineralization of whey and milk ultrafiltration permeate by nanofiltration and pilot-plant scale“. *Desalination*. № 198, 2006: 274–281.

Roman, A. 2009. „Partial demineralization and concentration of acid whey by nanofiltration combined with diafiltration“. *Desalination*. № 241, 2009: 288–295.

Rukhadze, Sh. Kamkamidze, N. Gobejhvili L. Khazaradze N. 2018. „FRESHWATER SUPPLY FOR SHIPS DESALINATED BY METHOD OF

ELECTRODIALYSIS“, International Scientific Journal *Innovations*, Year VI Issue 3/2018, Sofia ISSN Print 2603-3763 ISSN Web 2603-3771, pp. 116-118.

Евдокимов И.А., Дыкало Н.Я., Пермьяков А.В. 2009. *Электродиализ молочной сыворотки*: монография. Георгиевск: ГТИ (филиал) СевКавГТУ.

Донских, А.Н. 2010. „Технология творожной сыворотки: предпосылки к разработке / А.Н. Донских [и др.]“ *Вестник СевКавГТУ*. № 2 (23), 2010: 60–62.

Свитцов А.А. 2007. *Введение в мембранные технологии*. СПб.: ДеЛи Принт.

Тёпел А. 2012. *Химия и физика молока*. СПб.: Профессия.

Проверка адекватности регрессии. Критерий Фишера. 2021. Электронный ресурс. <https://yandex.ru/video/search?filmId=1754966660358862942&text=определение%20критерия%20критерий%20фишера> (дата обращения:01.03.2021).

სტატია იბეჭდება შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით (CANYS-19-972)