

Е. А. Чеботарев [E. Al. Chebotaryov]

УДК 637.232.14.001

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИРОВЫХ ШАРИКОВ В МЕЖТАРЕЛОЧНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ В ПРОЦЕССЕ СЕПАРИРОВАНИЯ****EXPERIMENTAL STUDY OF THE DISTRIBUTION OF FAT GLOBULES IN INTER-TERRITORIAL SPACES DURING SEPARATION**

Северо-Кавказский федеральный университет

**Аннотация.** Значительное влияние на основы как элементарной, так и гидродинамической теории сепарирования оказывают исследования распределения выделяемых фракций в межтарелочных пространствах. Необходимость развития подобных исследований возникла при создании научно-технических основ совершенствования процессов и технологии центробежного выделения дисперсных фаз из молочной сыворотки.

**Материалы и методы.** Для таких исследований использовался прибор для отбора проб сыворотки из вращающегося барабана сепаратора. При отборе проб жидкости из вращающегося барабана капиллярная отборная трубка в укладывалась в межтарелочное пространства, а прибор закреплялся на горловине сепаратора. Проводился отбор проб подсырной сыворотки их 5 точек, в которых определялось содержание жира и распределение жировых шариков по размерным классам.

**Результаты и обсуждения.** Экспериментально исследованы распределения жировых шариков в межтарелочных пространствах барабана сепаратора – экспериментальной установки в процессе сепарирования натуральной подсырной сыворотки. Отбор проб продукта производился непосредственно из межтарелочных пространств вращающегося барабана сепаратора. Их дисперсный анализ позволил спрогнозировать картину движения легких дисперсных частиц в межтарелочном зазоре.

**Заключение.** Анализ полученных данных позволил сделать вывод о возможных причинах недостаточно эффективного выделения молочного жира из подсырной сыворотки в двухсекционном барабане сепаратора.

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, межтарелочные пространства, сепарирование, подсырная сыворотка, дисперсный анализ.

**Abstract.** Research into the distribution of fractions in the inter-plate spaces has a significant impact on the fundamentals of both elementary and hydrodynamic theory of separation. The need to develop such research arose when creating the scientific and technical basis for improving the processes and technology of centrifugal separation of dispersed phases from whey.

**Materials and methods.** The distribution of fat globules in pilot separator installation inter-disk spaces during the separation of natural cheese whey is studied. Product sampling carried out directly from the inter-disk spaces of the separator rotating drum. Their dispersion analysis allows predicting the pattern of light dispersed particles motion in the inter-plate gap.

**Results and discussions.** For such studies, an instrument was used to sample the whey from the rotating drum of the separator. When sampling fluid from a rotating drum, the capillary sampling tube was placed in the inter-plate space, and the device was fixed on the mouth of the separator. Cheese whey samples were sampled from 5 points, where the fat content and the distribution of fat globules by size classes were determined.

**Conclusion.** The analysis of the obtained data allowed concluding about the possible reasons for the insufficiently effective extraction of milk fat from cheese whey in the two-section separator drum.

**Key words:** pilot separator installation, inter-disk spaces, separation, cheese whey, disperse analysis.

**Введение.** Сепарирование является одним из основных процессов молочной промышленности. Сформулированы и развиваются теоретические основы процессов сепарирования. В результате сложилось два направления теории сепарирования (математического моделирования процесса тонкослойного центробежного разделения): элементарная теория сепарирования [1] и гидродинамическая теория сепарирования [2]. Первая из них базируется на рассмотрении движения дисперсных фаз в межтарелочном пространстве, вторая – на рассмотрении движения потока (сходящегося или расходящегося) в пространстве между тарелками (вставками).

При кажущемся различном подходе к теоретическому (и математическому) обоснованию процесса центробежного разделения эти теории не следует считать взаимоисключающими, поскольку они, так или иначе, дополняют друг друга. Именно такой подход во многом определяет современное развитие исследований в области

процессов сепарирования и может быть применен при создании научно-технических основ совершенствования процессов центробежного выделения дисперсных фаз в барабанах сепараторов.

Значительное влияние на основы как элементарной, так и гидродинамической теории сепарирования оказывают исследования распределения выделяемых фракций в межтарелочных пространствах. Впервые такие исследования были проведены Н.Н.Липатовым [3], которому удалось, устанавливая капиллярную трубку в межтарелочный зазор и используя специальный прибор для взятия проб жидкости, проанализировать распределение фракций в межтарелочном пространстве сепаратора-разделителя и сепаратора-осветлителя. Хотя опыты проводились на сепараторе с ручным приводом, но они стали, по сути, основополагающими для исследований в этом направлении.

Необходимость развития подобных исследований возникла при создании научно-технических основ совершенствования процессов и технологии центробежного выделения дисперсных фаз из молочной сыворотки.

**Материалы и методы.** Прибор, примененный для отбора проб сыворотки из вращающегося барабана сепаратора – экспериментальной установки приведен на рисунке 1. На его конструкцию получено авторское свидетельство СССР за № 1086360 [4].

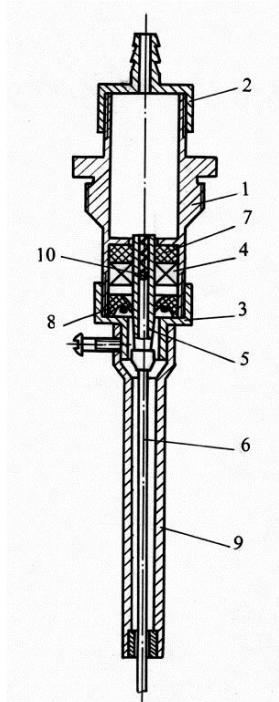


Рис. 1. Прибор для отбора проб жидкости из вращающегося барабана сепаратора: 1 – корпус; 2, 3 – крышки; 4 – подшипник; 5 – полый вал; 6 – пробоотборная трубка; 7, 8 – уплотнения; 9 – наконечник; 10 – обратный клапан

Прибор состоит из корпуса 1 в виде полого цилиндра, имеет две крышки: верхнюю 2 и нижнюю 3. В нижней части корпуса прибора установлен шарикоподшипник 4 с вращающимся в нем полым валом 5, на который надевается сменная заборная трубка 6. С верхней стороны вал герметизируется манжетным 7, а с нижней – фторопластовым 8 уплотнениями. Разрежение внутри корпуса создается подключением к штуцеру верхней крышки 2 вакуумного насоса.

Для предотвращения срыва и обрыва пробоотборной трубки, что достаточно часто происходит при наборе барабаном рабочей частоты вращения, в нижней части прибора установлен трубчатый наконечник 9, обеспечивающий промежуточную опору отборной трубки, вращающейся вместе с барабаном сепаратора.

Сопрягаемые поверхности наконечника отборной трубки и полого вала выполнены коническими, что позволяет притирать их друг к другу. Для устранения вытекания отобранной пробы из корпуса в полости насадки 5 установлен обратный клапан 10.

При отборе проб жидкости из вращающегося барабана капиллярная отборная трубка в межтарелочном пространстве, а прибор на горловине сепаратора устанавливались по схеме, изображенной на рис. 2.

Медная отборная трубка 3 с наружным диаметром 1,2 мм и внутренним диаметром – 0,4 мм продевалась через трубчатый наконечник прибора и вставку 9, изготовленную из эластичной резины. Последняя, как и наконечник, центрует отборную трубку и повышает надежность работы установки. Затем осуществляется сборка барабана, в ходе которой конец отборной трубки устанавливается в исследуемой точке межтарелочного пространства. Для этого нижняя тарелка 1, обеспечивающая периферийную подачу продукта, имела отверстие, расположенное соосно с одним из вертикальных каналов 4 в пакетах, а нижняя тарелка исследуемого межтарелочного пространства 2 – специальное углубление.

Собранный барабан одевался на вал, а на станине сепаратора устанавливались приемник для сливок 10, приемник для обезжиренной фракции 11 и горловина 12. При этом отборная трубка вместе с трубчатым наконечником выводилась наружу. Наконечник отборной трубки одевался на полый вал, а трубчатый наконечник на цилиндрическую часть нижней крышки. Наконечник фиксировался стопорным винтом.

Установка прибора 5 на горловине сепаратора осуществлялась при помощи специальной крестовины, состоящей из наружного кольца 8 гайки 6. Гайка и кольцо соединены распорками 7 с резьбой, что позволяло осуществлять центровку прибора по оси вращения барабана.

После набора барабаном рабочей скорости вращения в него подавалась сыворотка. Через 3-4 минуты с начала сепарирования начинался отбор пробы продукта. Для этого включается вакуумный насос. Отбор пробы осуществляется в течение 8...12 минут, с тем, чтобы он не нарушал ход процесса сепарирования. По окончании отбора пробы сепарирование прекращали, и барабан сепаратора останавливается без торможения. После остановки барабана сепаратора отобранная проба выливалась из корпуса прибора и исследовалась.

Схема расположения точек отбора проб и укладки конца отборной трубки в межтарелочном пространстве показана на рисунке 3. Для исследования распределения жировых шариков в межтарелочном пространстве, расположенном в средней части разделительной секции, было выбрано 5 точек. Три из них (1,2 и 3) располагаются на образующей конической поверхности тарелки, проходящей через центр отверстия для вывода продукта, две другие (4 и 5) лежат на образующей тарелки, расположенной между отверстиями. Такое расположение точек отбора проб позволяет охватить исследованиями наиболее характерные точки межтарелочного пространства.

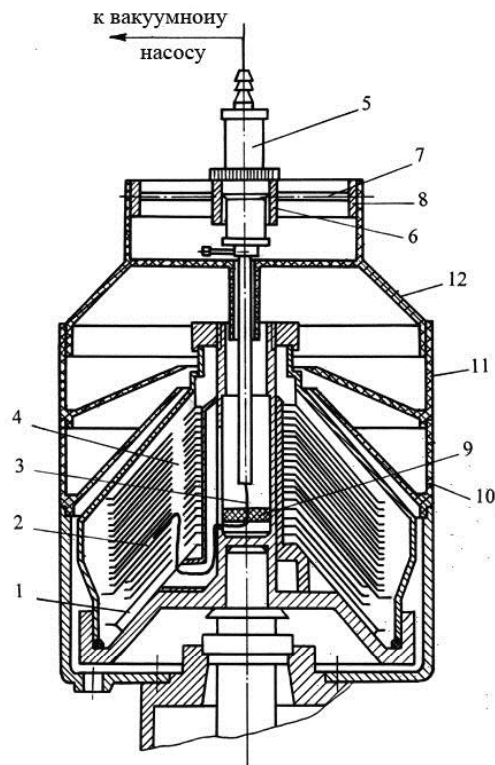


Рис. 2. Схема установки отборной трубки в барабане и прибора для отбора проб на горловине сепаратора:  
 1 – тарелка нижняя; 2 – исследуемое межтарелочное пространство; 3 – пробоотборная трубка; 4 – вертикальный канал, образованный отверстиями в тарелках; 5 – прибор для отбора проб жидкости из вращающегося барабана сепаратора;  
 6 – гайка; 7 – распорки; 8 – кольцо; 9 – вставка; 10 – приемник для сливок; приемник для обезжиренного продукта;  
 12 – горловина

Содержание жира в образцах определяли кислотным методом по стандартной методике с использованием жирометров с диапазоном измерения от 0 до 0,5%.

Для исследования распределения в молочной сыворотке молочного жира использовали микроскоп и микрофотонасадку. Образцы сыворотки помещали в камеру Горяева и выдерживали около 30 минут для всплывания жировых шариков.

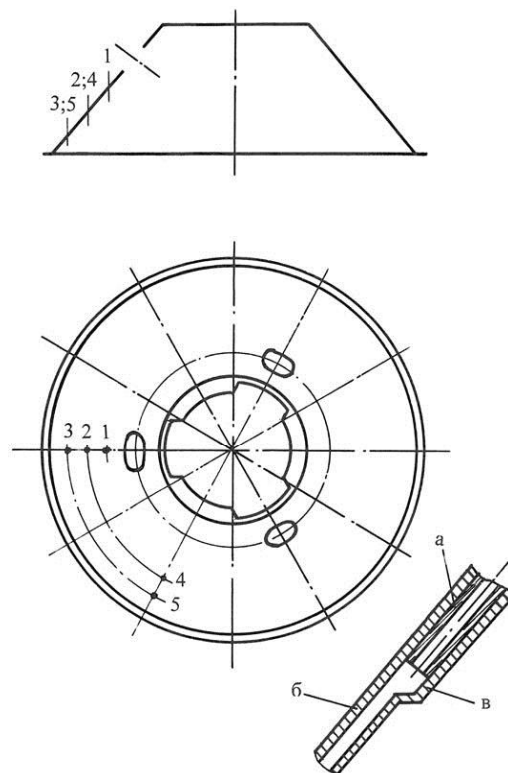


Рис. 3. Точки отбора проб и схема расположения отборной трубки в межтарелочном пространстве:  
1, 2, 3, 4, 5 – точки отбора проб; а – отборная трубка; б – верхняя тарелка; в – нижняя тарелка

**Результаты и обсуждение.** Микрофотографирование отобранных во всех точках образцов, а также исходной и просепарированной подсырной сыворотки позволило определить распределение в них жировых шариков по размерным классам.

В табл. 1 приведена характеристика образцов исходной, просепарированной и отобранных из различных точек межтарелочного пространства подсырной сыворотки.

Таблица 1

Характеристика образцов, полученных при сепарировании подсырной сыворотки и отборе проб из вращающегося барабана сепаратора

Место отбора образцов	Содержание жира, %	Среднее количество жировых шариков в одном поле зрения, шт.	Средний диаметр жировых шариков*, мкм
Сыворотка исходная	0,204	84,5	3,05
Сыворотка обезжиренная	0,061	48,2	2,68
Точка 1	0,305	97,8	3,32
Точка 2	0,317	112,1	3,20
Точка 3	0,163	71,7	2,99
Точка 4	0,342	159,3	3,00
Точка 5	0,190	81,3	2,91

\* средний диаметр жировых шариков определялся по формуле.

$$D_{cp} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n N_i D_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i}}, \quad (1)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр жирового шарика, мкм;  $N_i$  – число жировых шариков по размерным классам;  $D_i$  – средний диаметр размерного класса жировых шариков, мкм.

Сравнивая дисперсные характеристики образцов, отобранных из межтарелочного пространства, исходной и просепарированной подсырной сыворотки, можно прийти к следующим выводам.

Количество жировых шариков, проходящих через точку 1, в 1,16 раз превышает их число в исходном продукте. Интересно то, что рост числа жировых шариков сопровождается увеличением количества жировых шариков размером от 1 мкм до 2 мкм и от 2 мкм до 3 мкм и в некоторой мере крупных жировых шариков (более 6 мкм).

Изменение количества крупных жировых шариков обусловлено, по-видимому, коагуляцией более мелких частиц. Рост числа жировых шариков повысил жирность продукта в точке 1 в 1,5 раза по сравнению с исходным продуктом.

В таблице 2 дана характеристика дисперсного состава молочного жира этих образцов. Сепарирование позволило в 1,75 раза снизить число жировых шариков в подсырной сыворотке, но жирность продукта снизилась при этом только до 0,083 %. Тем не менее, обезжиренная сыворотка характеризуется наличием заметного числа жировых шариков крупнее 2 мкм (более половины всех жировых шариков). Следовательно, процесс центробежного разделения идет недостаточно эффективно.

Продукт, отобранный в точке 2, как и продукт из точки 1 отличается от исходной подсырной сыворотки более высоким содержанием жира. Кроме того, этот образец характеризуется более высоким, по сравнению с исходной сывороткой и образцом из точки 1, числом жировых шариков размером меньше 7 мкм, особенно наиболее мелких (диаметром до 1 мкм), количество которых ниже почти в 1,5 раза. При росте числа жировых шариков в точке 2 жирность этого образца по сравнению с исходной сывороткой ниже на 55,4%.

Таблица 2

Характеристика дисперсного состава молочного жира образцов подсырной сыворотки

Место отбора проб	Среднее количество жировых шариков в одном поле зрения микроскопа, шт., по размерным классам, мкм										
	до 1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	более 10
Сыворотка исходная	7,0	30,6	28,0	10,0	5,8	1,9	0,6	0,3	0,2	0,1	-
Сыворотка обезжиренная	5,7	17,0	16,6	6,1	1,8	0,8	0,2	-	-	-	-
Точка 1	7,8	34,9	29,2	14,5	6,4	2,8	0,8	0,5	0,4	0,2	0,3
Точка 2	11,3	39,6	35,1	14,5	6,4	3,1	1,0	0,3	0,3	0,3	0,2
Точка 3	5,5	24,5	24,9	10,1	4,4	1,4	0,5	0,2	0,2	-	-
Точка 4	23,3	77,3	36,7	10,7	5,5	2,6	1,3	0,7	0,4	0,4	0,4
Точка 5	6,7	27,9	31,3	8,8	3,4	1,8	0,8	-	-	-	-

Характеристика продукта из точки 3, как видно из табл. 2, значительно отличается от продуктов из точек 1 и 2. Во-первых, жирность его и количество жировых шариков меньше. Чем в исходной сыворотке. Это говорит о том, что линия раздела фаз находится между точками 2 и 3. Во-вторых, в продукте, отобранном в точке 3 меньше чем в продуктах из точек 1 и 2 жировых шариков всех размерных классов, в том числе и наименьших диаметров.

Сыворотка в точке 3 больше чем в 2 раза жирнее обезжиренной, хотя расстояние от этой точки до края тарелки сравнительно невелико и едва ли на этом отрезке происходит такое изменение жирности. Явление это возникает, по-видимому, вследствие прохождения по периферии барабана необезжиренной сыворотки. При этом некоторые, наиболее крупные жировые шарики, попадают в межтарелочные пространства, и их присутствие влияет на характеристику сыворотки, отобранной в точке 3.

Точка 4 равноудалена от оси вращения с точкой 2. Но жирность продукта из точки 4 выше, чем из точки 2 и превышает исходную жирность почти в 1,7 раза. Такое различие жирности продукта в расположенных на одном расстоянии от оси вращения точках 2 и 4 хорошо согласуется с результатами подобных исследований по распределению жировых шариков при сепарировании молока [1] и подтверждает расположение точки 4 в зоне интенсивного движения сливок. В точке 4 количество жировых шариков самое большое из всех изученных точек.

Их дисперсный состав характеризуется большим числом жировых шариков размером менее 3 мкм, особенно диаметром 1 и 2 мкм. Число последних почти вдвое больше, чем в продукте из точки 2. Это опять же подтверждает расположение точки 4 в зоне интенсивного потока сливок.

Точка 5 расположенная с точкой 3 на одном расстоянии от оси вращения. Как и в точке 3 жирность продукта в точке 5 ниже жирности исходной сыворотки, то есть линия раздела фаз располагается выше точки 5.

Приняв во внимание различие в жирности исходной сыворотки, тем не менее, можно отметить, что точка 5 характеризуется большим скоплением жировых шариков, чем точка 3. По-видимому, такое различие связано с траекторией движения крупных жировых шариков из шламового пространства в межтарелочные пространства.

В точке 5 радиальная составляющая скорости движения жидкости меньше, чем в точке 3, что несколько уменьшает унос жировых шариков из межтарелочных пространств.

Можно предположить, что именно в этой зоне происходит выделение жировых шариков, попавших в межтарелочные пространства с периферии барабана. Кроме того, точка 5 находится ближе к зоне интенсивного движения сливок, чем точка 3.

С удалением от оси вращения уменьшается величина среднего диаметра жирового шарика. Если в точке 1 средний диаметр жирового шарика больше, чем в исходной сыворотке и составляет 3,32 мкм, то в точках 3 и 5, расположенных близко к отбортовкам тарелок, данная величина уменьшается соответственно до 2,99 мкм и 2,91 мкм.

Необходимо отметить, что точка 2, имея меньшее содержание жира, содержит жировые шарики большего среднего диаметра, чем точка 4. Аналогичное соотношение и в точках 3 и 5.

Характеристику дисперсного состава молочного жира образцов, отобранных из межтарелочного пространства можно представить в виде интегральных функций распределения жировых шариков

$$D(\delta) = \frac{100}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma} \int_{-\infty}^{\lg \delta} \exp \left[ -\frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{2 \lg^2 \sigma} \right]^2 d(\lg \delta), \quad (2)$$

где  $D(\delta)$  – суммарный относительный выход жировых шариков в пределах от  $-\infty$  до  $\lg \delta$ , т.е. В интервале размеров от 0 до  $\delta$ , %;

Функции представляют собой прямые линии и могут быть, по аналогии с жировыми шариками молока, описаны формулами нормально-логарифмического закона [5]. Коэффициенты, входящие в формулы этих нормально-логарифмических распределений, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры функции нормально-логарифмического распределения жировых шариков в образцах, отобранных из межтарелочного пространства разделительной секции

Место отбора пробы	Параметры нормально-логарифмической функции	
	медиана распределения ( $D_{50}$ ), мкм	среднеквадратичное отклонение логарифмов диаметров ( $\lg \sigma$ )
1	2	3
Точка 1	1,65	0,260
Точка 2	1,57	0,270
Точка 3	1,44	0,281
Точка 4	1,18	0,326
Точка 5	1,27	0,328

Как видно из приведенных в таблице 3 данных, уменьшение медианы распределения системы с удалением от оси вращения происходит за счет равномерного увеличения относительного количества жировых шариков практически всех размерных классов. Образцы, отобранные на одной образующей, характеризуются близкими значениями среднеквадратичного отклонения логарифмов диаметров.

Эта величина, как известно, характеризует степень полидисперсности гетерогенной системы. С этой точки зрения, образцы, отобранные в точках 1, 2 и 3, имеют более близкую к монодисперсной систему жировых шариков, чем образцы взятые из точек 4 и 5.

Полидисперсность жировых шариков в точках 4 и 5 подтверждает предположение о том, что в этих точках, расположенных в зоне наибольшего движения сливок, происходит выделение и «пришедших» с периферии крупных жировых шариков.

**Заключение.** Таким образом, исследование распределения жировых шариков в межтарелочном пространстве сепаратора подтверждает наличие отрицательно сказывающегося на результатах обезжиривания явления – прохождение части необезжиренной сыворотки из осветлительной секции в разделительную в зазоре между внутренней стенкой шламowego пространства барабана и отбортовкой межсекционной разделительной тарелки. Часть жировых шариков (наиболее крупных) при этом попадают в межтарелочные пространства разделительного пакета тарелок, а остальные (не попавшие в межтарелочные пространства) оказывают непосредственное влияние на неудовлетворительное (около 0,1%) содержание жира в просепарированном продукте.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Липатов Н. Н. Сепарирование в молочной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1971. 400 с.
2. Гольдин А. М. Гидродинамические основы процессов тонкослойного сепарирования / А. М. Гольдин, В. А. Карамзин. М.: Агропромиздат, 1985. 259 с.
3. Липатов Н. Н. Методика и прибор для взятия проб жидкости из роторов центрифуг и сепараторов // Известия вузов: Пищевая технология, 1962. № 4. С. 9-12.
4. Прибор для взятия проб жидкости: а. с. 1086360 СССР: МКИ G 01 C 01/10 / Е. А. Чеботарев, Н. Н. Липатов, О. П. Новиков, П. Г. Нестеренко (СССР). № 3567353/23-26 ;заявл. 24.03.83 ; опубл. 15.04.84 Бюл. № 14. 3 с.: ил.
5. Беяков В. И. О законе распределения жировых шариков молока / В. И. Беяков, Е. А. Михайловский, Н. А. Рогов и др. // Молочная промышленность, 1973. № 5. С. 23-25.

#### REFERENCES

1. Lipatov N. N. Separirovanie v molochnoy promyshlennosti. M.: Pishchevaya promyshlennost', 1971. 400 s.
2. Gol'din A. M. Gidrodinamicheskie osnovy protsessov tonkosloynogo separirovaniya / A. M. Gol'din, V. A. Karamzin. M.: Agropromizdat, 1985. 259 s.
3. Lipatov N. N. Metodika i pribor dlya vzyatiya prob zhidkosti iz rotorov tsestrifug i separatorov // Izvestiya vuzov: Pishchevaya tekhnologiya, 1962, № 4, s. 9-12.
4. Pribor dlya vzyatiya prob zhidkosti: a. s. 1086360 SSSR : MКИ G 01 S 01/10 / E. A. Chebotarev, N. N. Lipatov, O. P. Novikov, P. G. Nesterenko (SSSR). № 3567353/23-26 ;zayavl. 24.03.83 ; opubl. 15.04.84 Byul. № 14. 3 s.: il.
5. Belyakov V. I. O zakone raspredeleniya zhirovyykh sharikov moloka / V. I. Belyakov, E. A. Mikhaylovskiy, N. A. Rogov i dr. // Molochnaya promyshlennost', 1973. № 5. S. 23-25.

#### ОБ АВТОРЕ

**Чеботарев Евгений Алексеевич**, доктор технических наук, профессор профессор, кафедра «Строительство», СКФУ, eacheb@mail.ru, 89624117423

**Chebotaryov Evgeny Alekseevich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department "Civil Engineering", NCFU, eacheb@mail.ru, 89624117423

Дата поступления в редакцию: 22.02.2019 г.

После рецензирования: 04.03.2019 г.

Дата принятия к публикации: 22.04.2019 г.