

УДК 66.01:532

## Применение блока нечеткой логики для обработки эксперимента по газированию молочной сыворотки в пакете программ MatLab

Д-р техн. наук Г.В. Алексеев, аспирант Е.П. Башева, katushik7@gmail.com

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*В статье описывается математическая модель струйного сатуратора. Молочная сыворотка является побочным продуктом при производстве традиционных белково-жировых продуктов – сыра, творога и казеина. В зависимости от вида основного продукта, полученного по традиционной технологии, молочную сыворотку различают как подсырная, творожная и казеиновая. Добавление творожной сыворотки в напитки позволяет расширить ассортимент рыночного сегмента. Газосодержание безалкогольных напитков определяется степенью растворимости углекислого газа в жидкости. Получена диаграмма зависимости газосодержания воды от температуры и давления, которая показывает, что максимальное значения степени насыщения достигает 7,0 г/л. Учитывая физические свойства воды, а именно плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$ , проделали эксперимент с молочной сывороткой. Рассмотрена одна из моделей сатурации (насыщения двуокисью углерода) произвольной пищевой жидкости. Приводится обработка результатов эксперимента с использованием блока программ, реализующих подходы нечеткой логики, показавшая адекватность построенных моделей реально происходящим процессам.*

**Ключевые слова:** струйный сатуратор; газирование; молочная сыворотка; обработка эксперимента; нечеткая логика; графическая интерпретация.

---

## Modeling of the interaction flow food mixture with element worker cameras of the device

D. Sc. G.V. Alekseev, E.P. Basheva katushik7@gmail.com

ITMO University 191002,

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Mathematical model jet saturation is described in article. The Dairy whey is a by-products at production traditional protein-fatty products – a cheese, pot cheese and casein. Depending on type main about, got on traditional technology, milk whey mark as casein. The accompaniment whey's in drink to increase the assortment of the market segment. Gazosoderzhanie nonalcoholic drink is defined by degree carbon dioxide in liquids. get;receive-On diagram of the dependencies of carbonated я water from the temperature and pressures which shows that maximum importance degree saturation reaches 7,0 г/л. Teach Physical characteristic of water, as follows density and viscosity, have done experiment with milk whey is Considered one of the models to saturations (the saturation by dioxide of carbon) free food liquid. Happens to processing a result experiment with is-use of the block of the programs, realizing approaches of the ill-defined logic, showed adequacy of the built models real occurring process*

**Keywords:** jet saturation; carbonated; dairy whey; processing experiment; ill-defined logic; graphic interpretation.

---

В настоящее время для предприятий молочной промышленности актуальными являются задачи более полного и рационального использования молочной сыворотки, которая является основным видом вторичного молочного сырья. Молочная сыворотка является побочным продуктом при производстве традиционных белково-жировых продуктов – сыра, творога и казеина. В зависимости от вида основного продукта, полученного по традиционной технологии, молочную сыворотку обозначают как подсырная, творожная и казеиновая.

Добавление творожной сыворотки в напитки позволяет расширить ассортимент рыночного сегмента. Газосодержание безалкогольных напитков определяется степенью растворимости углекислого газа в жидкости.

Рассмотрим одну из моделей сатурации (насыщения двуокисью углерода) некоторой пищевой жидкости.

Пусть первоначально сформированная инжектором струя движется прямолинейно в цилиндрическом корпусе до соударения с жидкостно-газовой пробкой, сформированной внутри камеры смешения за счет

взаимодействия потока со стенками камеры смешения. Потoki в камере смешения характеризуются следующими параметрами:

1. Зона спутного движения струи жидкости и газового потока:

$$0 < x < L_T,$$

где  $x$  – ось координат направленная вдоль продольной оси сатуратора;

$L_T$  – координата границы соударения струи с жидкостно-газовой пробкой.

Эта координата неизвестна и подлежит определению из расчета. Для упрощения задачи, решаем ее без учета изменения тепловой энергии потоков.

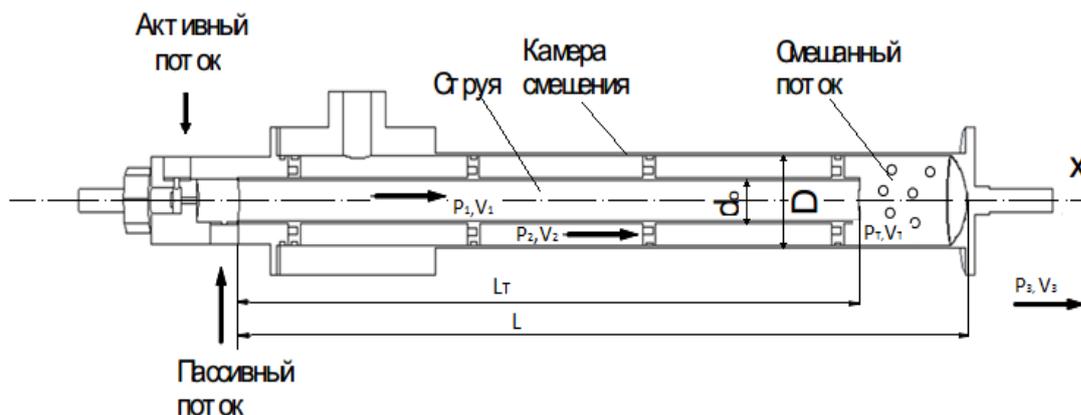


Рис.1. Схема движения газа в сатураторе

$V_3$  – скорость газожидкостного потока на выходе из камеры смешения;

$P_T$  – давление на границе соударения струи с жидкостно-газовой пробкой;

$V_T$  – скорость на границе соударения струи с жидкостно-газовой пробкой.

В рамках нашей модели рассмотрим две зоны.

$P_1$  – давление на выходе из сопла, считается заданной величиной;

$V_1$  – скорость струи, также заданная величина;

$P_2$  – давление (разряжение), создаваемое в приемной камере;

$V_2$  – скорость газового потока на входе в камеру смешения;

$P_3$  – давление газожидкостного потока на выходе из камеры смешения;

Граничные условия для скорости в зоне спутного движения потоков запишутся следующим образом:

условие на стенке камеры смешения при  $r = D/2$ ,  $V_2 = 0$ , где  $D$  – диаметр камеры смешения.

Условия сопряжения потоков (условие равенства скоростей и касательных напряжений на границе газового потока и струи, соответственно)

при  $r = d_0/2$ ,  $V_2 = V_1$ ,  $\frac{dV_1}{dx} = \frac{dV_2}{dx}$ , где  $d_0$  – диаметр отверстия сопла;

Запишем следующие уравнения: баланс массы  $m_1 + m_2 = m_T = m_3$ . (1)

Индексы 1, 2 и 3 относятся соответственно к потоку жидкости из сопла, потоку газа из приемной камеры и жидкостно-газовому потоку из камеры смешения. Индекс  $T$  относится к сечению, где происходит преобразование двух отдельных потоков в один смешанный поток.

Массовый расход  $m_i$  каждого из потоков рассчитываем по формуле

$$m_i = \rho_i V_i F_i, \tag{2}$$

где  $\rho_i$  – плотность,  $V_i$  – скорость,  $F_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го потока, соответственно.

Скорость  $i$ -го потока определяется по формуле

$$V_i = \frac{Q_i}{F_i}, \tag{3}$$

где  $Q_i$  – объемный расход  $i$ -го потока.

Площади поперечных сечений потоков находим следующим образом:

для жидкостной струи

$$F_1 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4}, \quad (4)$$

для газового потока

$$F_2 = \frac{\pi(D^2 - d_0^2)}{4}, \quad (5)$$

толщину стенки сопла не учитываем,  
для смешанного газожидкостного потока

$$F_3 = F_T = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (6)$$

Баланс количества движения

$$m_1 V_1 + P_1 F_1 + m_2 V_2 + P_2 F_2 = (m_1 + m_2) V_T + P_T F_T. \quad (7)$$

Баланс энергии

$$m_1 \frac{V_1^2}{2} + m_2 \frac{V_2^2}{2} = (m_1 + m_2) \frac{V_T^2}{2}. \quad (8)$$

Потери энергии на трение о стенки и изменение внутренней энергии потоков не учитываем. Так как ось камеры смешения направлена горизонтально, изменение потенциальной энергии потоков также не учитывается.

2. Зона движения смешанного газожидкостного потока  $L_T < x < L$ , где  $L$  – длина камеры смешения.

Для перепада давления для двухфазного потока можем записать

$$\Delta P = P_T - P_3 = \lambda \Phi^2 \frac{(L - L_T) P_T V_T^2}{D^2}, \quad (9)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления,  $\Phi^2$  – параметр Мартинелли [1].

Коэффициент сопротивления находится по формуле Блазиуса [1] для однофазного турбулентного потока

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (10)$$

где число Рейнольдса рассчитывается по формуле  $Re = \frac{V_T D \rho_T}{\mu_T}$ .

Здесь  $\rho_T$  – плотность и  $\mu_T$  – вязкость смешанного потока определяется по формулам

$$\frac{1}{\rho_T} = \frac{X_g}{\rho_g} + \frac{1 - X_g}{\rho_l} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\mu_T} = \frac{X_g}{\mu_g} + \frac{1 - X_g}{\mu_l}, \quad (12)$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_l$  – плотность газового и жидкостного потока,  $\mu_g$  и  $\mu_l$  – вязкость газового и жидкостного потока,  $X_g$  – расходное массовое газосодержание.

Параметр Мартинелли определяется по формуле

$$\Phi^2 = \left(1 + X_g \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_l}\right) \left(1 + X_g \frac{\mu_l - \mu_g}{\mu_l}\right)^{-0,25}. \quad (13)$$

Из уравнения (9) можно получить формулу для расчета значения давления  $P_T$

$$P_T = P_3 + \lambda \Phi^2 \frac{(L - L_T) P_T V_T^2}{D^2}. \quad (14)$$

Из уравнения (7) и (8) найдем скорость  $V_T$

$$V_T = \frac{m_1 V_1 + P_1 F_1 + m_2 V_2 + P_2 F_2 - P_T F_T}{m_1 + m_2}, \quad (15)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{m_1 + m_2}}. \quad (16)$$

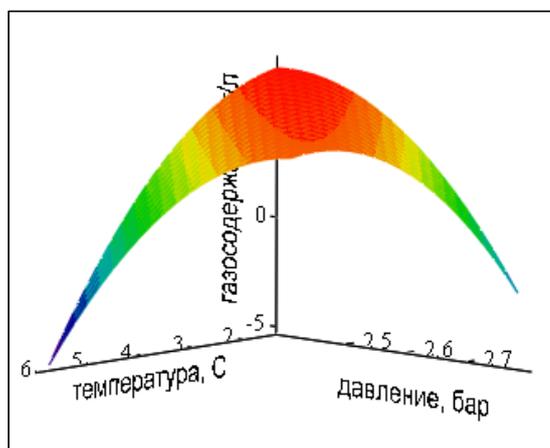
Приравняем полученные выражения и сделаем замену  $P_T$  из (14). Получим формулу для определения  $L_T$

$$L_T = \frac{m_1 V_1 + P_1 F_1 + m_2 V_2 + P_2 F_2 - P_3 F_3 - (m_1 + m_2) \sqrt{\frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{m_1 + m_2}}}{\lambda \frac{\rho_T \Phi^2 m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{2D m_1 + m_2}} \quad (17)$$

Диаграмма зависимости газосодержания воды от температуры и давления показывает, что максимальное значения степени насыщения достигает 7,0 г/л (рис.2) Учитывая физические свойства воды, а именно плотность  $\rho$  и вязкость  $\mu$ , проделали эксперимент с молочной сывороткой. В таблице указаны экспериментальные данные, соответственно, газирования воды и сыворотки.

**Экспериментальные данные о газосодержании**

Параметры	Показатели									
температура °С	1,5	1,7	1,9	2,7	3,6	4,8	5	5,4	5,8	6
давление подачи, бар	2,4	2,4	2,4	2,6	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8
газосодержание воды ,г/л	7	6,8	6,6	6,4	6,4	6,3	6,3	6,2	6,1	6
газосодержание сыворотки ,г/л	5	4,8	4,8	4,6	4,6	4,5	4,4	4,3	4,1	4,0



F, (X, Y, Z)  
**Рис. 2. Графическое изображение зависимости газосодержания воды от параметров процесса**

Молочная сыворотка содержит 0,5–0,8% белковых веществ, калия до 0,19%; кальция до 0,11%; натрия 0,05%; магния 0,02%; фосфора 0,1% и хлора 0,11%, поэтому газирование сыворотки, по сравнению с водой, затруднено.

Из сравнения зависимостей для газосодержания воды и молочной сыворотки видно, что при более низкой температуре и постоянном давлении подачи газа его содержание имеет меньшее значение степени насыщения, по сравнению с водой. Обуславливается это химическим составом молочной сыворотки, содержащей белковые и минеральные добавки.

Соответствующие значения коэффициентов множественной регрессии типа приведены на рис. 3.

Кроме традиционной статистической обработки данные экспериментов по газированию молочной сыворотки обрабатывались с помощью специального программного блока реализованного в пакете MatLab на базе подходов нечеткой логики.

Для моделирования процесса использовали модуль Fuzzy Logic Toolbox, входящий в пакет MatLab. Построение системы проводилось на основе экспериментальных данных и сенсорного анализа.

Качество полученного продукта зависит от указанных выше показателей: температуры и давления.

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 2 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{а)}$$

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} 10.968 \\ -61.054 \\ 279.321 \\ -312.245 \\ -25.278 \\ -0.492 \end{pmatrix} \quad \text{б)}$$

$$\text{coeffs} = \begin{pmatrix} 7.612 \\ -40.225 \\ 182.378 \\ -201.946 \\ -17.106 \\ -0.404 \end{pmatrix} \quad \text{в)}$$

**Рис. 3. Коэффициенты уравнения регрессии**

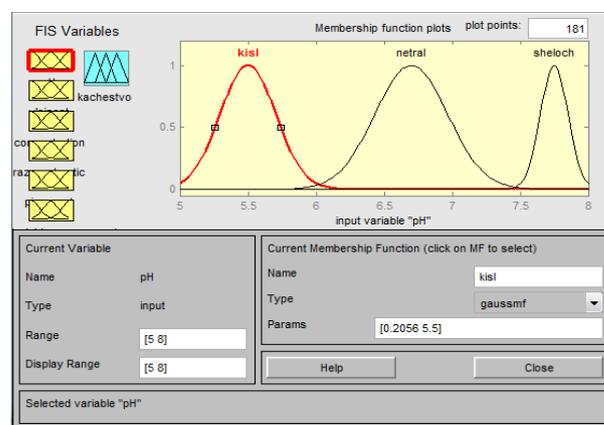
а) – степеней переменных; б) x – температуры; в) y – давления

Пример задания входных переменных отражен на рис. 4. Редактирование выходной переменной производится аналогично редактированию входных переменных.

Тип функции принадлежности каждой переменной соответствует распределению по Гауссу (рис. 5). Пример графика принадлежности функций после задания типа распределения отображен на рис. 6.



**Рис. 4. Задание входных переменных в систему нечеткого вывода**



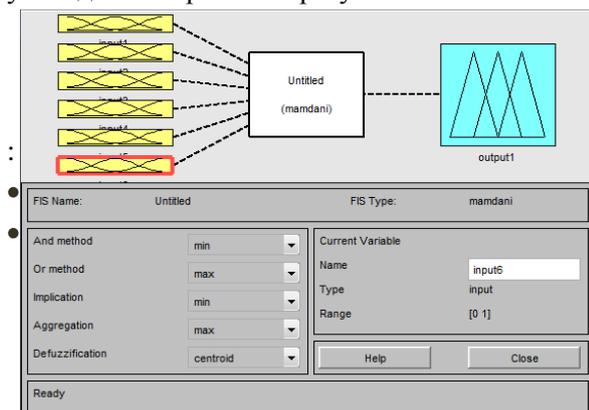
**Рис. 5. Выбор вида функции принадлежности и их количества**

Связь входных переменных с выходными задают правила ввода, которые должны быть включены в систему после построения функций принадлежности. Для задания правил были установлены значения входных переменных, соответствующие наилучшим показателям качества

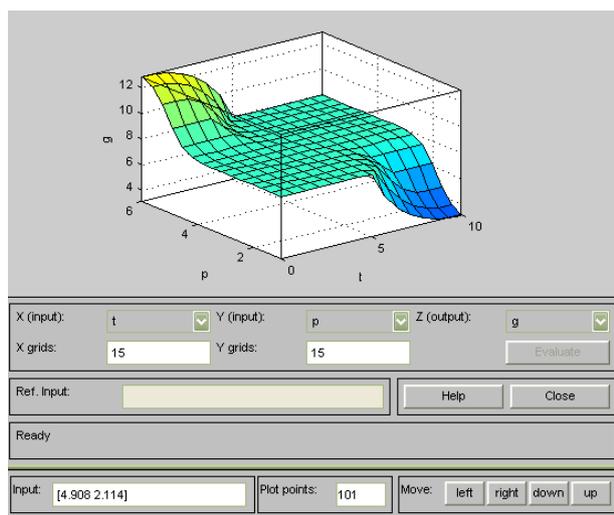
В окно задания базы знаний вводятся соответствующие правила, связывающие входные переменные с выходной.

Для визуализации нечеткого логического вывода используют команду View rules . Данное средство просмотра правил позволяет отобразить процесс нечеткого логического вывода и получить результат.

Главное окно средства просмотра состоит из нескольких графических окон, располагаемых по строкам и столбцам. Количество строк соответствует числу правил нечеткого логического вывода, а количество столбцов – числу входных и выходных переменных, заданных в разрабатываемой системе. Дополнительное графическое окно служит для отображения результата нечеткого логического вывода и операции дефазификации.



**Рис.6. Задание характеристик входной переменной температуры системы нечеткой логики**



**Рис.7. Результаты обработки эксперимента по газированию молочной сыворотки**

В каждом окне отображается соответствующая функция принадлежности, уровень ее среза (для входных переменных) и вклад отдельной функции принадлежности в общий результат (для выходных переменных).

Полученные результаты обработки экспериментальных данных подтверждают модельные представления о процессах, происходящих в сатураторе, в частности:

1. Качество полученного продукта зависит от указанных выше показателей, например, газосодержание воды и молочной сыворотки имеют различные значения степени насыщения при постоянном давлении подачи газа
2. При более низкой температуре и постоянном давлении подачи газа его содержание имеет меньшее значение степени насыщения
3. Эффект газонасыщения обуславливается химическим составом молочной сыворотки, содержащей белковые и минеральные добавки.

### Литература

1. Крымов Б.К., Калмановский В.И., Яшин Я.И. Хроматографический анализ растворенных газов. М.: Заводская лаборатория, 1971. № 2. С. 17-18.
2. Петухов Б.С. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Т. 1. Справочник по теплообменникам / пер. с англ., под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.
3. Башева Е.П., Алексеев Г.В., Чекунов Н.В. МПК А23 L2/54 Устройство для смешивания жидкостей газами: пат. 146078 Российская Федерация. 2014.
4. Алексеев Г.В., Гончаров М.В., Холявин И.И. Численное экономико-математическое моделирование и оптимизация: учеб. пособие. СПб.: ГИОРД, 2014.
5. Алексеев Г.В. Компьютерные технологии при проектировании и эксплуатации технологического оборудования: учеб. пособие. СПб., ГИОРД, 2012.
6. Алексеев Г.В., Лунев К.Н. Возможности совершенствования процесса и аппарата для розлива газонаполненной жидкости // Процессы и аппараты пищевых производств. 2009. № 1. С. 8-12.
7. Алексеев Г.В. Основы теории решения изобретательских задач: учеб. пособие. СПб., СПбГУНиПТ, 2004.
8. Терпугов Г.В., Мынин В.Н., Петров В.В. МПК В01F3/04, В01D63/06. Способ обработки жидкостей газами: пат. 2400295 Российская Федерация. 2009.
9. Аким Э.Л. МПК D21C3/00, В01F3/04. Устройство для растворения газов в водной среде: пат. 2378430 Российская Федерация. 2010.
10. Соколов В.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1970. 287 с.
11. Козлов Д.А. Математическая модель жидкостно-газового эжектора с прямолинейной камерой смешения [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.vstu.ru/files/vstu\\_periodical/1790/upload/2010-01.pdf](http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/1790/upload/2010-01.pdf) (дата обращения 15.01.15)
12. Алексеев Г.В., Даниленко Е.А. Возможности моделирования измельчения пищевых добавок для продуктов функционального питания // Вестник Международной академии холода. 2011. № 2.

13. *Верболюз Е.И., Антүфьев В.Т., Кобыда Е.В.* Исследование эффективности предварительной подготовки молочных продуктов к переработке // Вестник Международной академии холода. 2014. № 3.
14. *Арсеньева Т.П., Букачакова Л.С.* Исследование физико-химических и микробиологических показателей закваски алтайского кисломолочного напитка чеген // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2013. № 3.

### References

1. Krymov B.K., Kalmanovskii V.I., Yashin Ya.I. *Khromatograficheskii analiz rastvorenykh gazov*. Moscow, Zavodskaya laboratoriya Publ., 1971, no. 2, pp. 17-18.
2. Petukhov B.S. *Spravochnik po teploobmennikam*. V 2 t. T. 1. Spravochnik po teploobmennikam. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 560 p.
3. Basheva E.P., Alekseev G.V., Chekmenev N.V. *MPK A23 L2/54 Ustroistvo dlya smeshivaniya zhidkosti gazami*. Patent RF, no. 146078. 2014.
4. Alekseev G.V., Goncharov M.V., Kholyavin I.I. *Chislennoe ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya: ucheb. posobie*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2014.
5. Alekseev G.V. *Komp'yuternye tekhnologii pri proektirovanii i ekspluatatsii tekhnologicheskogo oborudovaniya: ucheb. posobie*. St. Petersburg, GIORД Publ., 2012.
6. Alekseev G.V., Lunev K.N. *Vozmozhnosti sovershenstvovaniya protsessa i apparata dlya rozliva gazonapolnennoi zhidkosti. Processes and equipment for food production*. 2009, no. 1, pp. 8-12.
7. Alekseev G.V. *Osnovy teorii resheniya izobretatel'skikh zadach: ucheb. posobie*. St. Petersburg, SPbGUNiPT Publ., 2004.
8. Terpugov G.V., Mynin V.N., Petrov V.V. *MPK V01F3/04, B01D63/06. Sposob obrabotki zhidkosti gazami*. Patent RF, no. 2400295. 2009.
9. Akim E.L. *MPK D21C3/00, B01F3/04. Ustroistvo dlya rastvoreniya gazov v vodnoi srede*. Patent RF, no. 2378430. 2010.
10. Sokolov V.Ya., Zinger N.M. *Struinye apparaty*. Moscow, Energiya Publ., 1970, 287 p.
11. Kozlov D.A. *Matematicheskaya model' zhidkostno-gazovogo ezhektora s pryamolineinoi kameroi smesheniya* URL: [http://www.vstu.ru/files/vstu\\_periodical/1790/upload/2010-01.pdf](http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/1790/upload/2010-01.pdf) (accessed 15.01.15)
12. Alekseev G.V., Danilenko E.A. *Vozmozhnosti modelirovaniya izmel'cheniya pishchevykh dobavok dlya produktov funktsional'nogo pitaniya. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2011, no. 2.
13. Verboloz E.I., Antuf'ev V.T., Kobyda E.V. *Issledovanie effektivnosti predvaritel'noi podgotovki molochnykh produktov k pererabotke. Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014, no. 3.
14. Arsen'eva T.P., Bukachakova L.Ch. *Issledovanie fiziko-khimicheskikh i mikrobiologicheskikh pokazatelei zakvaski altaiskogo kislomolochnogo napitka chegen. Scientific journal NRU ITMO. Series: "Processes and equipment for food production*. 2013, no. 3.