

УДК 532.5:681

Профессор Г.В. Алексеев, аспирант Е.П. Башева,
(Университет ИТМО) кафедра процессов и аппаратов пищевых производств
E-mail: gva2003@rambler.ru

доцент А.А. Дерканосова
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра сервиса и ресторанного бизнеса.
тел. +7 (920) 432-16-57
E-mail: aa-derk@yandex.ru

Professor G.V. Alekseev, post-graduate E.P. Basheva,
(ITMO University) Department processes and equipment for food production
Email: gva2003@rambler.ru
associate professor A.A. Derkanosova
(Voronezh State University of Engineering Technologies) Department of service and restaurant
business. phone +7 (920) 432-16-57
E-mail: aa-derk@yandex.ru

Возможные направления компьютерного моделирования и проектирования технологических машин и оборудования пищевых производств

Possible ways of computer modeling and design of technological machines and equipment for food production

Реферат. В статье рассматриваются возможности реализации новых подходов при моделировании и проектировании технологического оборудования и машин для пищевых производств. Одним из побудительных мотивов создания таких методов является «ресурсосбережение» интеллектуального труда разработчиков технологического оборудования. Возможности реализации таких подходов в значительной мере обусловлены успехами в области создания нейрокомпьютеров, позволяющих в определенной мере моделировать интеллектуальные процессы человеческого мозга, что при решении поставленных задач позволяет использовать не только исходные данные для создания нового образца техники, но и имеющийся у разработчика опыт работы в этой области. Особенную актуальность для разработчиков техники для пищевых производств такие методы имеют в связи часто с плохой «числовой» определенностью задаваемых при проектировании параметров. Используемый метод моделирования позволяет проводить анализ в условиях субъективной оценки эмпирических данных и отсутствии явной числовой формы результата, что характерно при разработке новых видов пищевых продуктов. Особенно ярко преимущества этих систем проявляются при проектировании многокомпонентных пищевых продуктов, где велика неопределенность входных и выходных параметров, а качество оценивается по результатам сенсорного анализа. Так же достоинством модели является возможность ее получения при выборе минимального набора закономерностей. Вследствие отсутствия необходимости ввода точных данных, время, требуемое для моделирования, резко сокращается. Применение аппарата нечеткой логики позволяет улучшить качество управления объектами, определить оптимальное соотношение рецептурных компонентов при проектировании новых многокомпонентных видов продуктов и сократить количество производственных опытов. При применении предлагаемых методов часто бывают полезны результаты предварительного аналитического моделирования проектируемого объекта. Рассмотрен опыт использования таких методов при проектировании сатуратора для насыщения пищевых жидкостей диоксидом углерода.

Summary. Possibilities of implementing of new approaches in the modeling and design of technological equipment and machines for food production are considered in the article. One of the motives for the creation of such methods is the "Resource saving" of technological equipment developers intellectual work. Possibilities of implementing of such approaches are largely due to the successes in the field of neuro-computers, allowing to some extent to simulate intelligent processes of the human brain that allows you to use not only the original data to create a new model of equipment but a developer's existing experience in this field in solving the tasks given. Such methods are of particular relevance for the development of equipment for food productions. But often it is due to poor "number" of certain parameters specified in designing. The method used for simulation allows analysis in a subjective evaluation of empirical data and the absence of a clear numerical form of the result, which is typical in development of new food types. Especially clearly the advantages of these systems are shown in designing multi-component food products, where the uncertainty of input and output parameters is high, and quality is assessed by sensory analysis. The advantage of the model is also the possibility of its obtaining in the selection of a minimum set of regularities. Due to the absence of necessity of precise data input, the time required for the simulation is sharply reduced. Application of of fuzzy logic device allows to improve the quality of objects management, to determine the optimal ratio of prescription components in designing of new types of multi-component products and to reduce the number of production tests. The results of preliminary analytical simulation of the object being designed are often useful in the application of the proposed methods. The experience of such methods application in the saturator designing for food liquids saturation with carbon dioxide was studied.

Ключевые слова: новые подходы при моделировании, проектирование технологического оборудования и машин, пищевые производства, нейрокомпьютеры, нечеткая логика.

Keywords: new approaches at modeling, technological equipment and machines designing, food production, neurocomputers, fuzzy logic.

© Алексеев Г.В., Башева Е.П., Дерканосова А.А., 2015

Проектирование оборудования в пищевых отраслях, так же как и во многих других, осуществляется по принципу «от достигнутого». В этом случае новый образец оборудования проектируется путем совершенствования наилучшего аналога существующего в настоящий момент оборудования, предназначенного для указанных в техническом задании целей.

Такой подход имеет определенные преимущества, такие как гарантии того, что разработанное оборудование будет не хуже известных образцов и будет иметь более короткий срок запуска в реальное производство, поскольку, как правило, инфраструктура всей технологической цепочки меняется незначительно [1].

В условиях ограниченности информации от применения новых или изменения известных узлов и деталей, позволяющей применять известные математико-статистические процедуры анализа результатов экспериментов, возможно продуктивным является использование подходов нечеткой логики, лежащей в основе создания нового поколения компьютерной техники – нейрокомпьютеров. Предполагается, что такое оборудование в значительной степени моделирует процесс мышления человека и помогает искать оптимальные условия решения поставленных задач на основе предшествующего опыта разработчика [2].

Проверка работоспособности таких предположений проводилась при разработке нового сатуратора для насыщения пищевых жидкостей диоксидом углерода, изображенного ниже на рисунке 1.

Для моделирования оценки газосодержания в жидкостях для различной комплектации узлов сатуратора и их размеров использовали модуль Fuzzy Logic Toolbox, входящий в пакет MatLab.

Для отдельных этапов применения подходов нечеткой логики рассмотрена модель предлагаемого струйно-барботажного сатуратора, включающая аналитическое описание отдельных участков перемещения пищевой жидкости: нисходящего потока, увлекаемого формируемой струей, торможения и барботажа двухфазного потока и восходящего потока обусловленного перепадом давления.

За счет энергии струи в виде спутных потоков газа и жидкости, направленных определенным образом частично происходит распределение пузырьков диоксида углерода по всему объему аппарата [3].

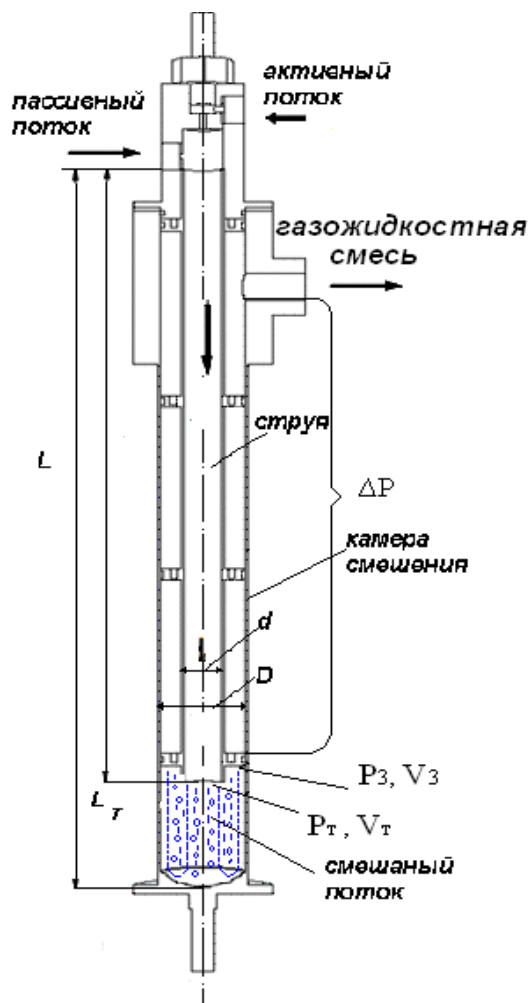


Рисунок 1. Схема струйно-барботажного сатуратора

Когда струя жидкости из сопла (активный поток) подается в цилиндрическую камеру смешения, то под действием высокой скорости, газ (пассивный поток) увлекается из приемной камеры в камеру смешения. Струя движется до соударения с жидкостно-газовой пробкой, сформированной внутри камеры смешения за счет взаимодействия жидкостно-газового потока со стенками камеры смешения [4].

Потоки в камере смешения характеризуются следующими параметрами: P_1 – давление на выходе из сопла, считается заданной величиной; H/m^2 ; V_1 – скорость струи, также заданная величина, m/c ; P_2 – давление (разряжение), создаваемое в приемной камере; H/m^2 ; V_2 – скорость газового потока на входе в камеру смешения, m/c ; P_T – давление на границе соударения струи с жидкостно-газовой пробкой, H/m^2 ; V_T – скорость на границе соударения струи с жидкостно-газовой пробкой, m/c ; P_3 – давление

потока при повороте на 180°C , $\text{H}/\text{м}^2$; V_3 – скорость потока при повороте на 180°C , $\text{м}/\text{с}$.

В рамках принятой модели рассмотрим зону образования и движения нисходящего потока на участке $(0 < x < L_T)$.

1) Зона спутного движения струи жидкости и газового потока:

$$0 < x < L_T,$$

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

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

Условие на стенке камеры смешения:

$$\text{при } r = D/2, V_2 = 0,$$

где D – диаметр камеры смешения.

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

$$\text{при } r = d_0/2, V_2 = V_1, \frac{dV_1}{dx} = \frac{dV_2}{dx},$$

где d_0 – диаметр отверстия сопла, V_2 – скорость газового потока на границе со струей; V_1 – скорость струи на границе с жидкостным потоком.

Запишем следующие уравнения:

Баланс массы:

$$m_1 + m_2 = m_T = m_3 \quad (1)$$

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

Массовый расход m_i каждого из потоков рассчитывается по формуле:

$$m_i = \rho_i V_i F_i, \quad (2)$$

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

Скорость i -го потока определяется по формуле:

$$V_i = \frac{Q_i}{F_i}, \quad (3)$$

где Q_i – объемный расход i -го потока.

Площади поперечных сечений потоков находим следующим образом:

– для жидкостной струи

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

– для газового потока

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

Толщину стенки сопла не учитываем:

– для смешанного потока

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

Баланс количества движения:

$$m_1 V_1 + \rho_1 F_1 + m_2 V_2 + \rho_2 F_2 = (m_1 + m_2) V_T + \rho_T F_T \quad (7)$$

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.

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

Для перепада давления для двухфазного потока можем записать:

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

где λ – коэффициент сопротивления, Φ – параметр Мартинелли.

Коэффициент сопротивления находится по формуле Блаузиуса для однофазного турбулентного потока:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}, \quad (10)$$

где число Рейнольдса Re рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{V_T D \rho_T}{\eta_T}$$

Здесь ρ_T – плотность и η_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 ρ_g и ρ_l – плотность газового и жидкостного потока, μ_g и μ_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 :

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

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

$$V_T = \sqrt{\frac{m_1 V_1^2 + m_2 V_2^2}{m_1 + m_2}} \quad (15)$$

Моделирование сатуратора при входе газожидкостной смеси в барботажную и циркуляционную зону включает в себя анализ влияния потерь давления, а также поворота потока на 180°.

Общий перепад давления в сатураторе на восходящем участке:

$$\Delta p = \Delta p_l + \Delta p_m + \Delta p_{in} + \Delta p_h, \quad (16)$$

где Δp_l – потери по длине; Δp_m – местные потери; Δp_{in} – инерционные потери; $\Delta p_h = \rho_{см} g H \cos \alpha$ – потери на преодоление сопротивления газожидкостного слоя высотой H , здесь α – угол наклона оси канала к вертикали.

Потери давления при входе газожидкостной смеси в барботажную трубу и циркуляционную зону или при выходе из них, а также при поворотах потока на 180° рассчитываются как потери на местных сопротивлениях:

$$\Delta P_m = \xi_i \frac{\rho_{ж} V_{жб}^2}{2(1 - \varepsilon_o)^2}, \quad (17)$$

где ξ_i – коэффициент местного сопротивления при повороте потока на 180° ξ_{180}

Приведенные соотношения помогают определить давление на входе участка сатуратора с восходящим потоком газожидкостной смеси [5].

Следующий этап моделирования включает численный анализ влияния давления на выходе барботажного участка на преодоление потерь на трение и на придание газожидкостной смеси кинетической энергии для выхода из сатуратора.

Разность атмосферного давления и давления на выходе с барботажного участка напором обозначим буквой H . Потери на трение $h_{тр}$ состоят из потерь на прямолинейных участках и местных потерь и могут быть вычислены по формуле:

$$h_{тр} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (18)$$

Составная часть напора, расходуемая на придание жидкости кинетической энергии h_k ,

$$h_k = \frac{v^2}{2g}. \quad (19)$$

Учитывая, что $h_{тр} = H$, получим:

$$H = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

Гидравлическое сопротивление определим из уравнения турбулентного режима течения:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 0,87 \ln(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (21)$$

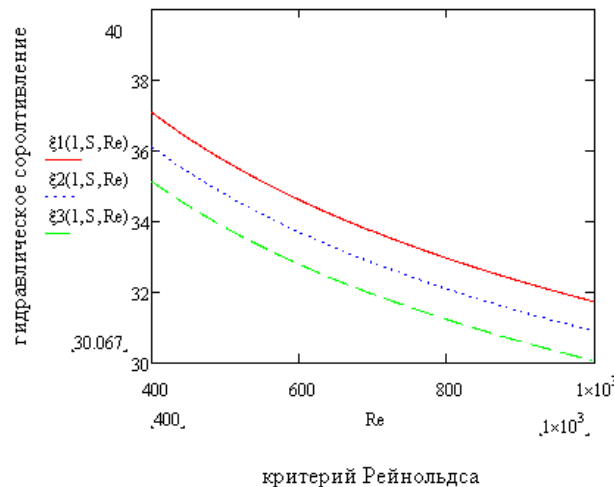


Рисунок 2. Зависимость гидравлического сопротивления потока от его диаметра для различных напоров

Дальнейший расчет восходящего потока или потока в трубопроводе состоит в том, что определяется количество турбулизирующих колец при рассчитанном значении общего гидравлического сопротивления и гидравлического сопротивления одного кольца определенного для заданных геометрических характеристик по формуле, предложенной ЦАГИ для перфорированных пластин:

$$\xi(l/d_o, S, Re_b) = 3,23(0,85 + 0,15l/d_o) \times [0,31 + 2S^2/(1-S)^2] Re_b^{-0,17}. \quad (22)$$

Для рассматриваемой конструкции сатуратора, используя данные предыдущих рисунков предварительно определяли число устанавливаемых колец.

При реальном проектировании сатуратора для установки на базе промышленного аппарата АВ-4 расчетные данные подтверждали в процессе эксперимента.



Рисунок 3. Модель струйно-барботажного сатуратора

Охлажденная до 1–2 °С вода роторным насосом подавалась в форсунку, после чего она проходила камеру, в который из отверстия для подачи газа под давлением поступал углекислый газ (CO_2). Здесь происходило смешивание водяной струи с газом и перемещение вдоль оси камеры. На выходе из камеры смешения полученная смесь ударялась об отбойный сферический элемент.

Отброшенная в насадочную колонну, смесь далее проходила между стенками камеры смешения и стенкой корпуса через перфорированные кольца для полного смешивания газа с водой. Отверстия в перфорированных кольцах при этом создают условия для повышения дисперсности структурированного потока газожидкостной смеси к отверстию выхода.

В процессе проведения экспериментальных исследований по газосодержанию прошедшей сатуратор пищевой жидкости измеряли все важнейшие параметры процесса газонаполнения.

К ним в первую очередь относятся:

- температура жидкой фазы – 1,5 – 6,0 [°С]
- давление CO_2 – 2,4 – 2,8 [атм]

Тип функции принадлежности каждой переменной принимали соответствующим распределению Гаусса.

Связь входных переменных с выходными задают правила ввода, которые должны быть включены в систему после построения функций принадлежности.

Для определения характера таких связей использовали решения, полученные при предварительном аналитическом моделировании.

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

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, то есть процедуры преобразования нечеткого множества в множество действительных чисел [4–5].

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

Для представления результатов моделирования в графическом виде, используют модуль Surface Viewer. Средство просмотра поверхности вывода позволяет строить трехмерную поверхность как зависимость одной из выходных переменных от двух входных.

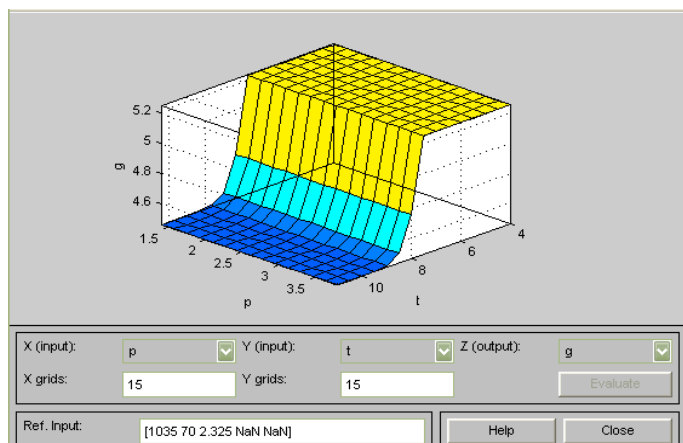


Рисунок 4. Зависимость газосодержания жидкости от температуры и давления

Поверхность вывода, соответствующая благоприятному результату, окрашивается в желтый цвет, а не благоприятному результату, окрашивается в синий цвет. Если результат соответствует некому среднему, промежуточному значению, то на графике эта область окрашивается в цвета градиентного перехода от желтого к синему.

По результатам моделирования показателей газосодержания были сделаны окончатель-

ные выводы, подтверждавшие эффективность использования данного метода при исследовании содержания диоксида углерода в жидкостях с заданными качественными характеристиками и параметрами оборудования. Например, для $Re=600$, $d=1,5$ мм и толщины 1 мм должно быть 6 пластин.

По результатам проектирования получен патент РФ на полезную модель.

ЛИТЕРАТУРА

1 Антипов С.Т., Васильев А.М., Дворецкий С.И., Ковалевский В.И. и др. Проектирование, конструирование и расчет техники пищевых технологий. Санкт-Петербург, 2013.

2 Шевцов А.А., Дерканосова А.А., Коротаева А.А., Муравьев А.С. Моделирование процесса распылительной сушки суспензии протеинового зеленого концентрата (ПЗК) // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 1 (63). С. 51–57.

3 Шевцов А.А., Дранников А.В., Муравьев А.С. Энергосберегающая технология утилизации фильтрата послеспиртовой барды // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014. № 4. С. 78–80.

4 Алексеев Г.В., Вороненко Б.А., Гончаров М.В., Холявин И.И. Численные методы при моделировании технологических машин и оборудования. Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2014.

5 Алексеев Г.В., Гришанова (Даниленко) Е.А., Кондратов А.В., Гончаров М.В. Возможности реализации эффектов кавитации для измельчения пищевого сырья // Вестник Международной академии холода. 2012. № 3. С. 45–47.

6 Пеленко В.В., Зуев Н.А., Ольшевский Р.Г., Иваненко В.П. и др. Оценка зависимости производительности измельчителей мяса от их конструкции и физико-механических свойств сырья // Вестник Международной академии холода. 2015. № 1. С. 9–15.

7 Шлейкин А.Г., Данилов Н.П. Особенности применения трансклутаминазы в переработке молока. // Вестник Международной академии холода. 2015. № 3. С. 13–18.

8 Смагин Б.И. Производственная функция как основа описания технологических закономерностей аграрной сферы производства // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК-продукты здорового питания. 2014. № 4. С. 94–100.

REFERENCES

1 Antipov S.T., Vasiliev M.A., Dvoretzky S.I., Kovalevsky V. I. Proektirovanie, konstruirovaniye i raschet [Designing, designed and calculation techniques of food technology]. Saint-Petersburg, 2013. (In Russ.).

2 Shevtsov A.A., Derkanosova A.A., Korotaeva A.A., Murav'ev A.S. Simulation of a spray drying process of a suspension of green protein concentrate (PGCs). *Vestnik VGUIT*. [Proceedings of the Voronezh state University of engineering technologies], 2015, no. 1 (63), pp. 51–57. (In Russ.).

3 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Murav'ev A.S. Energy-Saving technology for utilization of distillery stillage filtrate. *Izvestiya vuzov*. [News of higher educational institutions. Food technology], 2014, no. 4, pp. 78–80. (In Russ.).

4 Alekseev G.V., Voronenko B.A., Goncharov M.V., Kholyavin I. I. Chislennyye metody pri modelirovanii tekhnologicheskikh mashin [Numerical methods in the simulation of technological machines and equipment. Training manual]. Saint-Petersburg, 2014. (In Russ.).

5 Alekseev G.V., Grishanova (Danilenko) E.A., Kondratov A.V., Goncharov V. M. Possibilities of implementing the effects of cavitation for shredding food raw materials. *Vestnik MAKh*. [Proceedings of the International Academy of refrigeration], 2012, no. 3, pp. 45–47. (In Russ.).

6 Pelenko V.V., Zuev N.A., Olshevski R.G., Ivanenko V.P. et al. Assessment based performance meat grinders from their design and physical-mechanical properties of materials. *Vestnik MAKh*. [Proceedings of the International Academy of refrigeration], 2015, no. 1, pp. 9–15. (In Russ.).

7 Shleikin A.G., Danilov N.P. Features of application of transglutaminase in milk processing. *Vestnik MAKh*. [Proceedings of the International Academy of refrigeration], 2015, no. 3, pp. 13–18. (In Russ.).

8 Smagin B. I. Production function as the technological basis of the description of patterns of agrarian production. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti*. [Technology of food and processing industry of AIC-healthy food], 2014, no. 4, pp. 94–100. (In Russ.).