

Разработка математического обеспечения процесса регулирования температуры молока на выходе из секции охлаждения

Дмитрий М. Бородулин¹ borodulin_dmitry@list.ru  0000-0003-3035-0354

¹ Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

Аннотация. Автоматизация любых производств невозможно без соответствующего математического обеспечения систем автоматизации. Системы автоматического регулирования используются для различных параметров технологических процессов. Одним из основных технологических параметров в молочном производстве является температура, в связи с этим важной задачей автоматизации молочных производств является ее контроль и регулирование на различных участках технологических линий. Для этого была создана информационная схема технологического объекта управления с обозначением регулируемых технологических параметров. В результате анализа штатной эксплуатации технологического объекта управления установлены следующие параметры: температура холодной воды, коэффициент передачи данного канала; температура исходного молока, коэффициент передачи данного канала; температура окружающего воздуха, коэффициент передачи данного канала; давление холодной воды, коэффициент передачи данного канала; расход исходного молока, коэффициент передачи данного канала. Расчет одноконтурной системы автоматического регулирования температуры молока на выходе из секции охлаждения выполнена в программе IPC-CAD. В результате обработки полученных данных выяснилось, что, переходные процессы «аперiodический» и «с умеренным затуханием» обладают достаточным запасом устойчивости, так как степень затухания больше 0,75. Динамические ошибки в режимах настройки и проверки на грубость указанных процессов различаются на 0,02, то есть различия незначительны. Запас устойчивости «аперiodического» процесса выше, а динамическая ошибка несущественно превышает остальные варианты, поэтому для дальнейшего применения выбран именно этот вид переходного процесса. Таким образом, применение системы автоматического регулирования на основе разработанного математического обеспечения является целесообразным и эффективным, так как позволит сократить брак и повысить качество выпускаемой продукции за счет своевременного качественного регулирования основного технологического параметра – температуры молочного сырья. Из этого следует, что применение данной одноконтурной системы автоматического регулирования является целесообразным в молочной промышленности.

Ключевые слова: молоко, автоматизация производств, технологический процесс, математическое обеспечение, молочное предприятие

Mathematical Support to Control Milk Temperature at Cooling Outlets

Dmitriy M. Borodulin¹ borodulin_dmitry@list.ru  0000-0003-3035-0354

¹ Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia

Abstract. Automation of any production is impossible without the appropriate software for automation systems. Automatic control systems are used for various parameters of technological processes. Temperature is one of the main technological parameters in dairy production. Therefore, its control and regulation in various parts of technological lines is an important task for the automation of dairy production. For this, an information scheme of the technological control object was created with the designation of the controlled technological parameters. The following parameters were established as a result of the analysis of the normal operation of the technological control object: cold water temperature, transmission coefficient of this channel; the temperature of the source milk, the transmission coefficient of this channel; ambient air temperature, transmission coefficient of a given channel; cold water pressure, transmission coefficient of this channel; raw milk consumption, transmission coefficient of this channel. Calculation of a single-loop system for automatic control of milk temperature at the outlet of the cooling section was made using the IPC-CAD program. As a result of processing the obtained data, it was found that the transient processes "aperiodic" and "with moderate attenuation" have a sufficient margin of stability, since the degree of attenuation is greater than 0,75. Dynamic errors in the modes of tuning and checking for roughness of these processes differ by 0,02, that is, the differences are insignificant. The margin of stability of the "aperiodic" process is higher, and the dynamic error does not significantly exceed the other options, so this type of transient process was chosen for further application. Thus, the use of an automatic control system based on the developed software is expedient and effective, as it will reduce rejects and improve the quality of products due to timely quality control of the main technological parameter - the temperature of raw milk. From this it follows that the use of this single-circuit automatic control system is appropriate in the dairy industry.

Keywords: milk, automation of production, technological process, mathematical support, dairy enterprise

Введение

Главной задачей автоматизации производственных процессов на молочных предприятиях является внедрение полностью автоматизированного производственного участка [1–3].

Основные результаты этого:

- реализация заданного технологического режима, обеспечение высокой точности дозирования компонентов;

- контроль качества продукции на различных этапах производства [4];
- своевременное обнаружение и сигнализация выхода за допустимые пределы значения параметров технологического процесса, результатом чего является сокращение количества брака продукции, расхода сырья и, как следствие, себестоимости единицы продукта;
- расширение возможностей статистического и экономического анализа [5–10]

Для цитирования

Бородулин Д.М. Разработка математического обеспечения процесса регулирования температуры молока на выходе из секции охлаждения // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 1. С. 24–28. doi:10.20914/2310-1202-2022-1-24-28

For citation

Borodulin D.M. Mathematical Support to Control Milk Temperature at Cooling Outlets. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 1. pp. 24–28. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-1-24-28

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Одним из основных технологических параметров в молочном производстве является температура, в связи с этим важной задачей автоматизации молочных производств является ее контроль и регулирование на различных участках технологических линий.

Материалы и методы

Таблица 1.
Требования к системам автоматического регулирования (САР)

Table 1.
Requirements for automated control systems (ACS)

Параметр Parameter	Значение Value	Допустимые значения прямых показателей качества регулирования Permissible values of direct regulation metrics			
		У _{ст}	У _{дин}	t _p	Ψ
Температура молока на выходе из секции охлаждения, °C Milk temperature at the outlet from the cooling	54	±1	±4	5 мин	0,75

Информационная схема технологического объекта управления (ТОУ) представлена на рисунке 1.

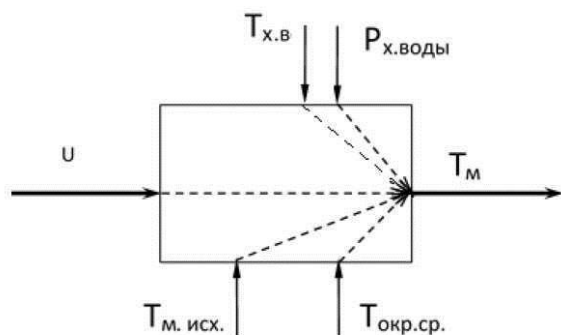


Рисунок 1. Информационная схема ТОУ

Figure 1. Schematic flow diagram for milk temperature control

На рисунке 1 приняты обозначения: регулируемый параметр ТМ – температура молока на выходе секции охлаждения, °C; U – положение регулирующего клапана на трубопроводе холодной воды, % х.р.о.; ТХ – температура холодной воды, °C; Рх. воды – давление холодной воды, МПа; Токр. ср. – температура окружающего воздуха, °C; Тм. исх. – исходная температура молока, °C; Рм. исх. – расход молока исходного, м³/ч.

Результаты

Для описания управляющего канала выбрана передаточной функцией апериодического звена второго порядка с запаздыванием [3,11] (1):

$$W(S) = \frac{k_0}{(T_3 S + 1)(T_4 S + 1)} e^{-\tau S} \quad (1)$$

где k₀ – коэффициент усиления, °C/%х.р.о.; T₃, T₄ – постоянные времени объекта, мин; τ – время запаздывания, мин. [12]

Параметры передаточной функции приведены в таблице 2.

Таблица 2.
Параметры передаточной функции по управляющему каналу

Table 2.
Transfer function parameters for control channel

k ₀ , °C/%х.р.о.	T ₃ , мин T ₃ , min	T ₄ , мин T ₄ , min	τ, мин τ, min
-0,7	0,69	0,73	0,52

В результате анализа штатной эксплуатации технологического объекта управления установлено:

- температура холодной воды меняется в пределах 10–15 °C, коэффициент передачи данного канала k_{Тхол.воды} = 1,5 °C / °C;
- температура исходного молока меняется в пределах 88–92 °C, коэффициент передачи данного канала k_{Тисх. мол.} = 1,8 °C / °C;
- температура окружающего воздуха меняется в пределах 15–35 °C, коэффициент передачи данного канала k_{Токр.возд} = 0,5 °C / °C;
- давление холодной воды изменяется в пределах 4–6 МПа, коэффициент передачи данного канала k_{Рхол. воды} = 0,4 °C / МПа;
- расход исходного молока меняется в пределах 18–22 м³/ч, коэффициент передачи данного канала k_{Рисх. мол.} = 2 °C / м³ / ч;

Диапазоны изменения возмущающих воздействий: ДТ.хол. воды. = 15–10 = 5 °C; ДТ.исх. мол. = 92–88 = 4 °C; ДТ.окр. возд. = 35–15 = 20 °C; ДР.хол. воды. = 6–4 = 2 МПа; ДР.исх. мол. = 22–18 = 4 МПа.

Максимальное возмущающее воздействие 8,8 % х.р.о.

Расчет одноконтурной САР температуры молока на выходе из секции охлаждения выполнена в программе IPC-CAD. Исходные данные для расчета приведены в таблице 2. Результаты расчета показателей настройки регулятора и качества регулирования приведены в таблице 3 [13].

Таблица 3.

Результаты расчета системы автоматического регулирования

Table 3.

Automated control system engineering

	Вид переходного процесса Type of transition	Параметры регулятора Controller parameters			Показатели качества Quality indices			Показатели качества при грубости Quality indices for roughness		
		K_p	$T_{из}$	$T_{пр}$	U_0	ψ	$1 p$	U_d	ψ	t_p
ПИД PID control	Апериодический Aperiodic	2,279	1,217	0,304	0,302	0,99	4,03	0,376	0,97	3,3
	С умерен. Затуханием Medium attenuation	2,84	1,13	0,28	0,28	0,99	3,18	0,35	0,86	5,99
	Колебательный Wave	3,954	1,234	0,309	0,257	0,76	5,14	0,329	0,29	-

В таблице 3 обозначены: k_p – коэффициент усиления регулятора, %х.р.о. / %шк. у; $T_{из}$ – время изодрома, мин; $T_{пр}$ – время предварения, мин; $уд$ – динамическая ошибка, %шк. у; ψ – степень затухания; $1 p$ – время регулирования, мин [11].

Как видно из таблицы, переходные процессы «апериодический» и «с умеренным затуханием» обладают достаточным запасом устойчивости, так как степень затухания больше 0,75. Динамические ошибки в режимах настройки и проверки на грубость указанных процессов различаются на 0,02, то есть различия незначительны [14].

Запас устойчивости «апериодического» процесса выше, а динамическая ошибка несущественно превышает остальные варианты, поэтому для дальнейшего применения выбран именно этот вид переходного процесса.

График переходных процессов для данных настроек показан на рисунке 2.

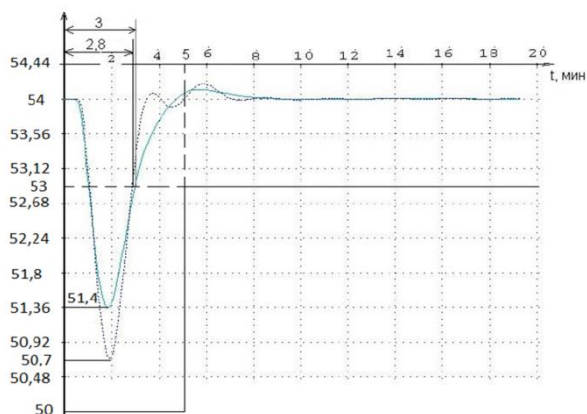


Рисунок 2. Графики переходных процессов в замкнутой САР для ПИД-регулятора «апериодический» (–) и при проверке на грубость (…)

Figure 2. Transient graphs in a closed automatic control system for “aperiodic” PID controller (–) and test for roughness (…)

Допустимые пределы показателей регулирования взяты из норм технологического регламента и технического задания на разработку математического обеспечения.

Из графика на рисунке 2 определяем прямые качественные показатели:

- динамическая ошибка $уд = 2,6^\circ\text{C}$ $< уд = 4^\circ\text{C}$;
- динамическая ошибка при «проверке на грубость» $уд = 3,3^\circ\text{C} < уд = 4^\circ\text{C}$;
- время регулирования – $t_{пр} = 3 \text{ мин} < t_p = 5 \text{ мин}$;
- время регулирования при «проверке на грубость» $t_{пр} = 2,8 \text{ мин} < t_{пр} = 5 \text{ мин}$.

Обсуждение

Из приведенных выше результатов расчета и анализа САР следует, что она является устойчивой, робостной и полностью соответствует техническому заданию по показателям качества регулирования [15].

Из этого можно сделать вывод, что применение данной одноконтурной САР является целесообразным

Передаточная функция регулятора будет выглядеть следующим образом:

$$W(P) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{из} \Delta S} + T_{пр} \Delta S \right) = \quad (2)$$

$$= 2,279 \times 7 \Delta S + 0,3041 \Delta S$$

Заключение

Разработанное математическое обеспечение процесса регулирования температуры молока на выходе из секции охлаждения показало полное соответствие техническому заданию. САР построенная на основе проведенных изысканий показала высокую надежность, устойчивость, достаточное время регулирования. Таким образом применение САР на основе разработанного математического обеспечения является целесообразным и эффективным, так как позволит сократить брак и повысить качество выпускаемой продукции за счет своевременного качественного регулирования основного технологического параметра – температуры молочного сырья [16–20].

Литература

- 1 Славянский А.А., Семенов Е.В., Алексеев А.А., Антипов С.Т. Математическое моделирование процесса центробежного промывания осадка паром (на примере сахарного производства) // Вестник ВГУИТ. 2019, Т. 81. № 1. С. 82–87. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-82-87
- 2 Рusanov В.В., Перов В.И., Самойлов М.А. Автоматизация предприятий общественного питания с использованием современных цифровых технологий: программ Arduino IDE, OPC Modbus и Master Scada // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 2. С. 38–44. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-38-44
- 3 Бабенко М.С. Разработка способа ИК пастеризации молока и комплексная оценка качества полученного продукта // Вестник ВГУИТ. №. 4. С. 130–134. doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-130-134
- 4 Антипов С.Т., Жучков А.В., Овсянников В.Ю., Бабенко М.С. Математическое моделирование процесса инфракрасной пастеризации молока // Вестник ВГУИТ. №. 4. С. 67–72. doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-67-72
- 5 Sipka S., Beres A., Bertok L., Varga T. et al. Comparison of endotoxin levels in cow's milk samples derived from farms and shops // Innate Immunity. 2015. V. 21. № 5. P. 531-536. doi: 10.1177/1753425914557100
- 6 Indumathy M., Sobana S., Panda R.C. Modelling of fouling in a plate heat exchanger with high temperature pasteurisation process // Applied Thermal Engineering. 2021. V. 189. P. 116674. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116674
- 7 Попов А.М., Плотников К.Б., Иванов П.П. и др. Моделирование мехатронных систем производства инстантированных напитков с добавлением амарантовой муки // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 2. С. 273–281. doi: 10.21603/2074-9414-2020-2-273-281
- 8 Харитонов В.Д., Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Комаров С.С. Моделирование смесительного агрегата центробежного типа на основе кибернетического подхода // Молочная промышленность. 2013. № 7. С. 77–79.
- 9 Бородулин Д.М. Разработка и математическое моделирование непрерывно-действующих смесительных агрегатов центробежного типа для переработки сыпучих материалов. Обобщенная теория и анализ (кибернетический подход). Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), 2013. 201 с.
- 10 Новосельцева М.А., Гутова С.Г., Каган Е.С. и др. Структурно-параметрическая идентификация модели процесса получения экстракта хмеля на роторно-пульсационной машине // Журнал пищевой промышленности и консервирования. 2020. Т. 44. № 7. С. 14546. doi: 10.1111/jfpp.14546
- 11 Жолдасбаев Е.Б. Расчет и анализ системы автоматического регулирования температуры растительного масла на выходе теплообменника // Холодильная техника и биотехнологии. 2019. С. 140-142.
- 12 Дмитриева Н. Сборник задач по теории автоматического управления. Линейные системы. Litres, 2018.
- 13 Приянка М.П.С., Субрамани П. Исследование схемы нагрева при тепловой обработке молока омическим нагревом // J Фармакогн. Фитохим. 2018. № 7. № 2. С. 3033-3036.
- 14 Аль-Хилфи А. Р., Абдулстар А. Р., Гавахян М. Пастеризация молока в непрерывном потоке в умеренном электрическом поле: влияние параметров процесса, энергопотребления и определения срока годности // Инновационная наука о продуктах питания и новые технологии. 2021. Т. 67. С. 102568.
- 15 Арья П. Новая техника в пищевой промышленности: Свет высокой интенсивности, Импульсное электрическое поле и инфракрасное излучение. 2020.
- 16 Килик-Акылмаз М. и др. Влияние термической обработки на микроэлементы, жирные кислоты и некоторые биологически активные компоненты молока // Международный молочный журнал. 2022. Т. 126. С. 105231.
- 17 Niamsuwan S., Kittisupakorn P., Mujtaba I.M. Control of milk pasteurization process using model predictive approach // Computers & Chemical Engineering. 2014. V. 66. P. 2-11. doi: 10.1016/j.compchemeng.2014.01.018
- 18 Kayalvizhi M., Manamalli D., Bhuvanithaa K. Cascade control of HTST milk pasteurization process with and without pre-cooling stage // 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). IEEE, 2017. P. 1807-1812. doi: 10.1109/ICECDS.2017.8389760
- 19 Nguyen V., Rimaux T., Truong V., Dewettinck K. et al. The effect of cooling on crystallization and physico-chemical properties of puff pastry shortening made of palm oil and anhydrous milk fat blends // Journal of Food Engineering. 2021. V. 291. P. 110245. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110245
- 20 Perano K.M., Usack J.G., Angenent L.T., Gebremedhin K.G. Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling // Journal of Dairy Science. 2015. V. 98. № 8. P. 5252-5261. doi: 10.3168/jds.2014-8784

References

- 1 Slavyansky A.A., Semenov E.V., Alekseev A.A., Antipov S.T. Mathematical modeling of the process of centrifugal washing of sludge with steam (on the example of sugar production). Proceedings of VSUET. 2019. vol. 81. no. 1. pp. 82–87. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-82-87 (in Russian).
- 2 Rusanov V.V., Perov V.I., Samoilov M.A. Automation of catering establishments using modern digital technologies: Arduino IDE, OPC Modbus and Master Scada programs. Proceedings of VSUET. 2018. vol. 80. no. 2. pp. 38–44. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-38-44 (in Russian).
- 3 Babenko M.S. Development of a method for IR pasteurization of milk and a comprehensive assessment of the quality of the resulting product. Proceedings of VSUET. no. 4. pp. 130–134. doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-130-134 (in Russian).
- 4 Antipov S.T., Zhuchkov A.V., Ovsyannikov V.Yu., Babenko M.S. Mathematical modeling of the process of infrared pasteurization of milk. Proceedings of VSUET. no. 4. pp. 67–72. doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-67-72 (in Russian).
- 5 Sipka S., Beres A., Bertok L., Varga T. et al. Comparison of endotoxin levels in cow's milk samples derived from farms and shops. Innate Immunity. 2015. vol. 21. no. 5. pp. 531-536. doi:10.1177/1753425914557100
- 6 Indumathy M., Sobana S., Panda R.C. Modeling of fouling in a plate heat exchanger with high temperature pasteurization process. Applied Thermal Engineering. 2021. vol. 189. pp. 116674. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116674

- 7 Popov A.M., Plotnikov K.B., Ivanov P.P. Modeling of mechatronic systems for the production of instant drinks with the addition of amaranth flour. 2020. vol. 50. no. 2. pp. 273–281. doi: 10.21603/2074-9414-2020-2-273-281 (in Russian).
- 8 Kharitonov V.D., Borodulin D.M., Sukhorukov D.V., Komarov S.S. Modeling of a centrifugal type mixing unit based on a cybernetic approach. Dairy industry. 2013. no. 7. pp. 77–79. (in Russian).
- 9 Borodulin D.M. Development and mathematical modeling of continuously operating centrifugal mixing units for processing bulk materials. Generalized theory and analysis (cybernetic approach). Kemerovo Technological Institute of Food Industry (University), 2013. 201 p. (in Russian).
- 10 Novoseltseva M.A., Gutova S.G., Kagan E.S. et al. Structural-parametric identification of the model of the process of obtaining hop extract on a rotary-pulsation machine. Journal of Food Industry and Canning. 2020. vol. 44. no. 7. pp. 14546. doi: 10.1111/jfpp.14546 (in Russian).
- 11 Zholdasbaev E.B. Calculation and analysis of the system for automatic control of the temperature of vegetable oil at the outlet of the heat exchanger. Kholodilnaya tekhnika i biotekhnologii. 2019. pp. 140-142. (in Russian).
- 12 Dmitrieva N. Collection of tasks on the theory of automatic control. Linear systems. Letters, 2018. (in Russian).
- 13 Priyanka M.P.S., Subramani P. Investigation of the heating scheme in the heat treatment of milk by ohmic heating. J Pharmacogn. Phytochem. 2018. no. 7. no. 2. pp. 3033-3036. (in Russian).
- 14 Al-Khilfi A. R., Abdulstar A. R., Gavakhyan M. Pasteurization of milk in a continuous flow in a moderate electric field: the influence of process parameters, energy consumption and determining the shelf life. Innovative science of food products and new technologies. 2021. vol. 67. pp. 102568. (in Russian).
- 15 Arya P. New technology in the food industry: High intensity light, pulsed electric field and infrared radiation. 2020. (in Russian).
- 16 Kilik-Akylmaz M. et al. Influence of heat treatment on trace elements, fatty acids and some biologically active components of milk. International Dairy Journal. 2022. vol. 126. pp. 105231. (in Russian).
- 17 Niamsuwan S., Kittisupakorn P., Muhtaba I.M. Control of milk pasteurization process using model predictive approach. Computers & Chemical Engineering. 2014. vol. 66. pp. 2-11. doi: 10.1016/j.compchemeng.2014.01.018
- 18 Kayalvizhi M., Manamalli D., Bhuvanithaa K. Cascade control of HTST milk pasteurization process with and without pre-cooling stage. 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). IEEE, 2017. pp. 1807-1812. doi:10.1109/ICECDS.2017.8389760
- 19 Nguyen V., Rimaux T., Truong V., Dewettinck K. et al. The effect of cooling on crystallization and physico-chemical properties of puff pastry shortening made of palm oil and anhydrous milk fat blends. Journal of Food Engineering. 2021. vol. 291. pp. 110245. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110245
- 20 Perano K.M., Usack J.G., Angenent L.T., Gebremedhin K.G. Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling. Journal of Dairy Science. 2015. vol. 98. no. 8. pp. 5252-5261. doi:10.3168/jds.2014-8784

Сведения об авторах

Дмитрий М. Бородулин д.т.н., кафедра инженерного дизайна, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, borodulin_dmitry@list.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Information about authors

Dmitriy M. Borodulin Dr. Sci. (Engin.), engineering design department, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, borodulin_dmitry@list.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Вклад авторов

Дмитрий М. Бородулин написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Dmitriy M. Borodulin wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 26/12/2021	После редакции 20/01/2022	Принята в печать 08/02/2022
Received 26/12/2021	Accepted in revised 20/01/2022	Accepted 08/02/2022