

## Применение адаптивного трёхпозиционного регулирования в системе автоматизированного управления тепловым объектом

В. Г. Рубанов<sup>1</sup> ✉, Д. В. Величко<sup>1</sup>, Д. А. Бушуев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им В.Г. Шухова  
ул Костюкова 46, г. Белгород 308012, Российская Федерация

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

### Резюме

**Цель исследования.** В качестве объекта управления рассматривался тепловой агрегат в виде модифицированной двухъярусной туннельной печи, предназначенной для производства пеностекольных блоков. Основной целью данной работы являлось исследование, состоящее в повышении качества выпускаемой продукции, снижении брака и в конечном итоге в повышении производительности за счёт разработки автоматизированной системы управления тепловым полем технологического агрегата по производству пеностекольных блоков с использованием адаптивного трёхпозиционного закона управления с адаптацией под нагрузку средней позиции регулятора.

**Методы.** На начальном этапе разрабатывалась функциональная схема автоматизации модифицированной двухъярусной туннельной печи. Для моделирования динамических дискретных систем применялся математический аппарат в виде помеченных сетей Петри, в результате чего осуществлялась алгоритмизация технологического процесса производства пеностекольных блоков. Данное решение поставленной задачи целесообразно использовать в виде методики алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации. Разработанную функциональную схему автоматизации можно преобразовать в мнемосхему, тем самым реализовав SCADA-систему, предназначенную для управления и визуализации, диагностики и слежения за процессом на централизованном пункте управления, что является частью автоматизированного рабочего места оператора-технолога. Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом имеет обобщённое представление. Решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме помеченной сети Петри.

**Результаты.** В ходе исследований разработан граф операций производственного процесса с дискретным адаптивным трёхпозиционным регулированием средней позиции под нагрузку. Для проверки правильности графа операций выполнено построение дерева достижимых маркировок, и проведен его анализ на соблюдение условий безопасности и живости сети. Разработана блок-схема основного алгоритма и алгоритма адаптации управляющей программы контроллера.

**Заключение.** Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом производства пеностекольных блоков имеет обобщённый характер хотя и проиллюстрирован на применении к конкретному объекту, поскольку допускает изменение как числа переменных  $x_i$ ,  $z_i$ , так и их функционального назначения, то есть вместо датчиков, толкателей, задвижек, значений параметров, например температуры, могут применяться другие элементы автоматики и другие физические переменные и их параметры. Таким образом, представленное решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме сети Петри и дерева достижимых маркировок для алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации.

**Ключевые слова:** адаптивное трёхпозиционное регулирование; помеченные сети Петри; граф операций; программируемый логический контроллер.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-070 от 29.11.2019 г.

**Для цитирования:** Рубанов В. Г., Величко Д. В., Бушуев Д. А. Применение адаптивного трёхпозиционного регулирования в системе автоматизированного управления тепловым объектом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(4): 230-243. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-230-243>.

Поступила в редакцию 18.09.2020

Подписана в печать 23.10.2020

Опубликована 30.12.2020

## Application of Adaptive Three-Position Control in the System of Automated Control of a Thermal Object

Vasiliy G. Rubanov<sup>1</sup> ✉, Dmitry V. Velichko<sup>1</sup>, Dmitry A. Bushuev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov  
46 Kostyukova str., Belgorod 308012, Russian Federation

✉ e-mail: rubanov.vg@bstu.ru

### Abstract

**Purpose of research.** The control object was considered to be a thermal unit in the form of a modified two-tier tunnel furnace designed for the production of foam glass blocks. The main goal of this work was to improve the quality of products, reduce defects, and ultimately increase productivity by developing an automated system for controlling the thermal field of a technological unit for the production of foam glass blocks using an adaptive three-position control law with adaptation to the load of the average position of the regulator.

**Methods.** At the initial stage, a functional automation scheme for a modified two-tier tunnel furnace was developed. To model dynamic discrete systems, a mathematical apparatus was used in the form of labeled Petri nets, which resulted in algorithmization of the technological process for the production of foam glass blocks. This solution to the problem should be used as a method of algorithmization and programming of the logic controller that is part of the automation system structure. The developed functional automation scheme can be converted into a mnemonic circuit, thereby implementing a SCADA system designed for control and visualization, diagnostics and monitoring of the process at a centralized control point, which is part of the automated workplace of the operator-technologist. The described approach to the development of an automated process control system has a generalized representation. The solution is methodological in nature, demonstrating the usability of the model in the form of a labeled Petri net.

**Results.** In the course of research, a graph of operations of the production process with discrete adaptive three-position control of the average position under load was developed. To check the correctness of the graph of operations, a tree of achievable markings was built, and its analysis was performed for compliance with security conditions and network liveliness. A block diagram of the main algorithm and the algorithm for adapting the controller's control program is developed.

**Conclusion.** The described approach to the development of an automated process control system for the production of foam glass blocks has a generalized character, although it is illustrated by applying it to a specific object, since it allows changing both the number of variables  $x_i$ ,  $z_i$ , and their functional purpose, that is, instead of sensors, pushers, valves, parameter values, for example, temperature, other automation elements and other physical variables and their parameters can be used. Thus, the presented solution is methodological in nature, demonstrating the convenience of using the model in the form of a Petri net and a tree of achievable markings for algorithmization and programming of a logic controller that is part of the automation system structure.

**Keywords:** adaptive three-position control; marked Petri net; graph of operations; programmable logic controller.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**Funding:** This work was supported by the Ministry of science and higher education of the Russian Federation under the agreement No. 075-11-2019-070.

**For citation:** Karlov A. E., Postolny A.A., Fedorov A.V., Jatsun S. F. Application of Adaptive Three-Position Control in the System of Automated Control of a Thermal Object. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020; 24(4): 230-243 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-4-230-243>.

Received 18.09.2020

Accepted 23.10.2020

Published 30.12.2020

\*\*\*

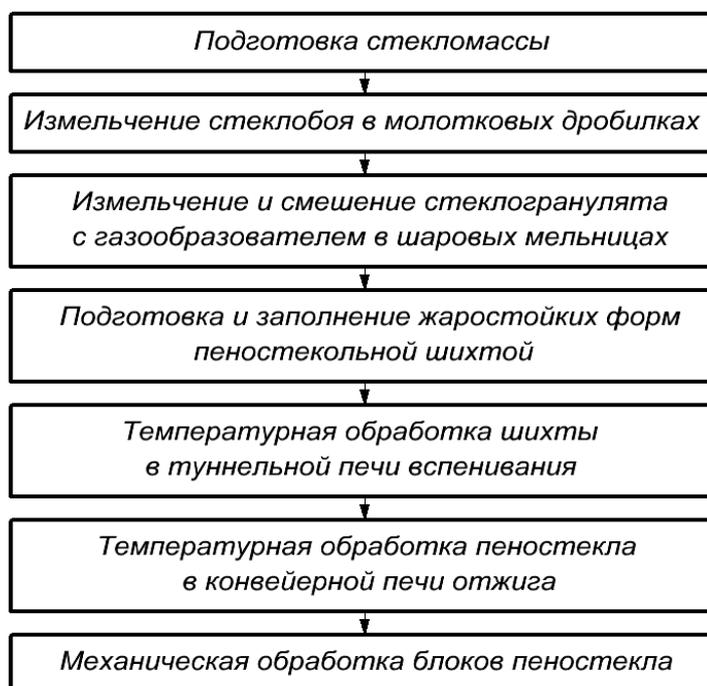
## Введение

К группе инновационных материалов, обладающих достаточно широким спектром положительных свойств, относится пеностекло [1-3]. Используется данный материал как в строительстве, так и в энергетике, машиностроении и нефтехимической отрасли.

Наиболее известными производителями пеностекляной продукции в странах дальнего зарубежья являются «Pittsburgh Corning» (США) и «Lanzhou Pengfei Heat Preservation Co., Ltd.»

(КНР); в России и странах ближнего зарубежья: ОАО «Гомельстекло» (Беларусь), ЗАО «СТЭС-Владимир» (РФ).

Производство (рис. 1) качественного блочного пеностекла отличается высокой трудоемкостью и относительной сложностью автоматизации, что следует из особенностей физико-химических процессов, происходящих на разных стадиях его изготовления (вспенивание шихты, термоудар вязкой массы, отжиг пеностекляных блоков) [4].



**Рис. 1.** Технологический процесс производства пеностекла

**Fig. 1.** Technological process of foam glass production

Оптимизация температурного режима теплового агрегата (рис. 2) представляет собой один из наиболее значимых этапов в технологии производства любого материала, в том числе и пеностекольных продуктов.

Достижение сформулированной цели предполагает решение следующих задач: во-первых, получение математической модели технологического процесса производства пеностекла и оценка её адекватности [5-9]; во-вторых, разработка эффективного способа экспрес-

анализа пеностекольной шихты [10-11], позволяющего определить основные её параметры и характеристики, в частности, температуру вспенивания  $T_{всп}$  (см. рис. 2); в-третьих, разработка нелинейной системы адаптивного трёхпозиционного управления и исследование её динамики; в-четвёртых, разработка структуры системы управления, алгоритмов управления и их программно-аппаратной реализации [12-19].

В данной работе приведены результаты решения четвёртой задачи.

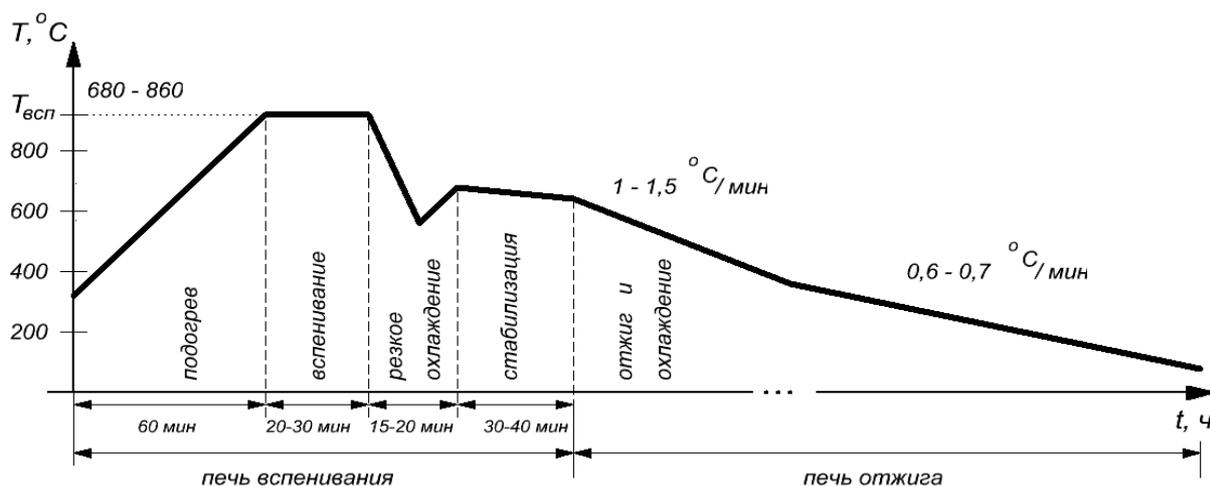


Рис. 2. Температурный режим работы теплового агрегата

Fig. 2. Temperature mode of operation of the heat unit

### Материалы и методы

Очевидным является тот факт, что используемый режим позволяет обеспечивать получение пеностекла с широким спектром свойств.

Анализ технологического процесса производства пеностекольных блоков, уровня автоматизации отдельных технологических переделов и сформулированные требования к системам управления тепловым полем технологическо

го агрегата позволили сформулировать цель научного исследования, состоящую в повышении качества выпускаемой продукции, снижении брака и в конечном итоге к повышению производительности за счёт разработки автоматизированной системы управления тепловым полем технологического агрегата по производству пеностекольных блоков с использованием адаптивного позиционного закона управления.

В качестве объекта автоматизации рассматривался модифицированный вариант двухъярусной туннельной печи

[20], функциональная схема которой приведена на рис. 3.

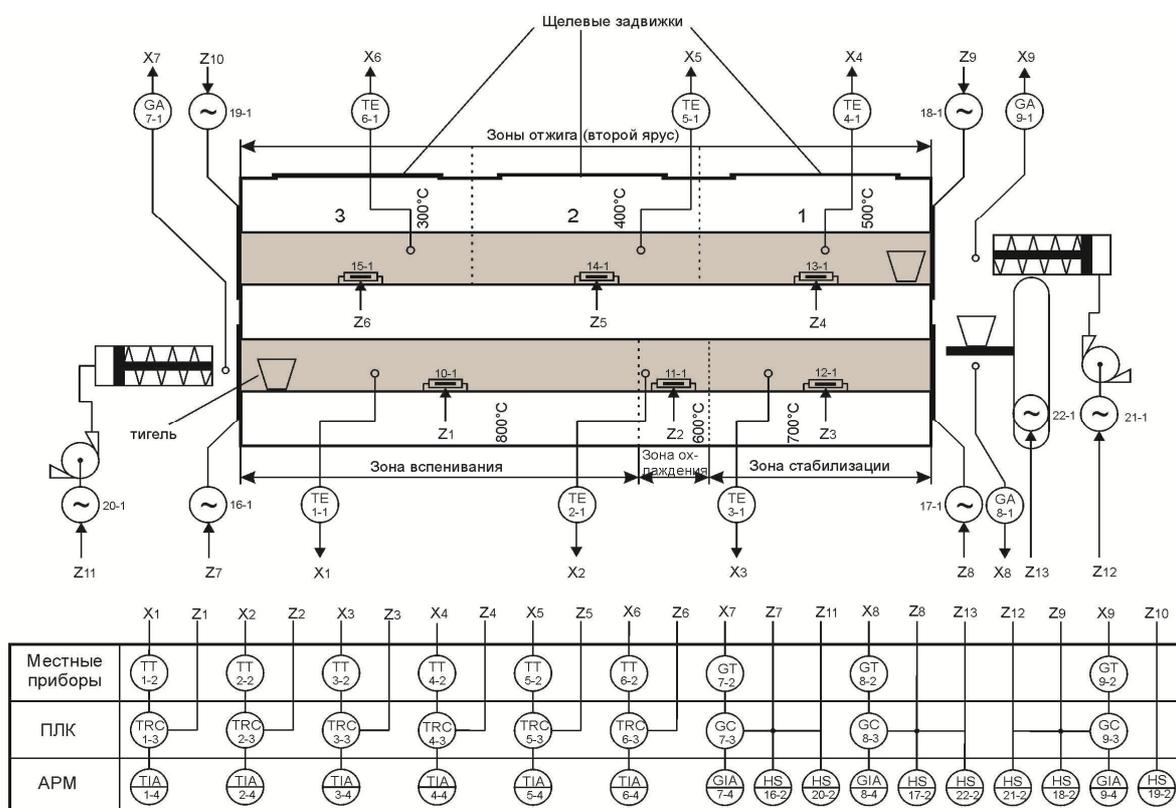


Рис. 3. Функциональная схема автоматизации двухъярусной туннельной печи

Fig. 3. Functional diagram of automation of a two-tier tunnel furnace

Этот автоматизированный тепловой агрегат выполняет работу следующим образом [13, 14]. На начальной стадии производится настройка температурного режима двухъярусной туннельной печи на параметры пеностекляной шихты, представляющей собой смесь стеклобоя и газообразователя, взятых в определённых пропорциях. Данная смесь поступает из помольного участка, где с помощью весовых дозаторов ей заполняются специализированные металлические формы, предназначенные для пеностекляной шихты. Далее поэтапно металлические формы с шихтой проходят секции печи

вспенивания, расположенной на нижнем уровне. Перемещение на верхний уровень осуществляется с помощью подъящика, где происходит отжиг пеностекляных блоков.

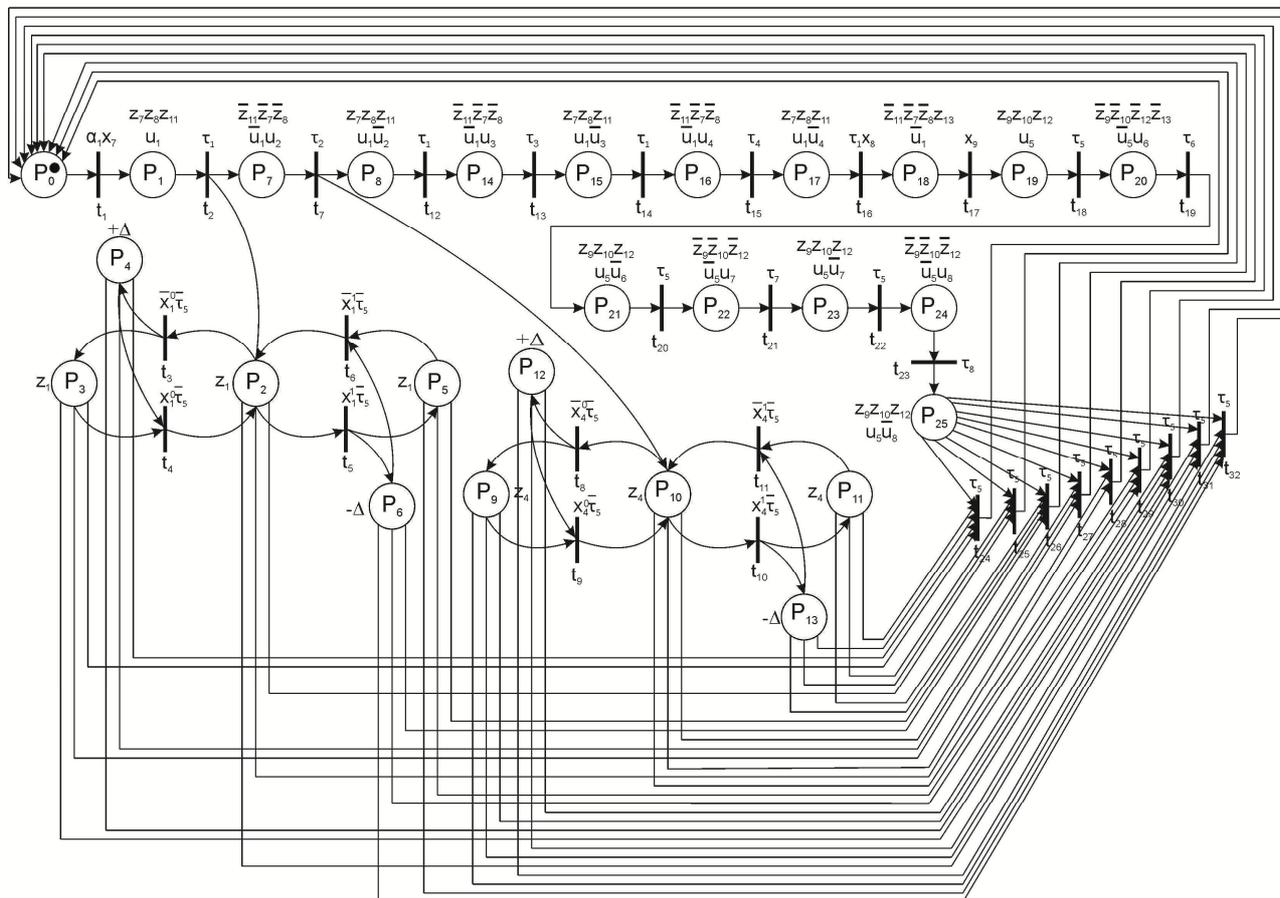
Для управления подобного рода системами можно использовать программируемые логические контроллеры (ПЛК). Приведенную схему автоматизации можно преобразовать в мнемосхему, тем самым реализовав SCADA-систему, предназначенную для управления и визуализации, диагностики и слежения за процессом на централизованном пункте управления, что является

ся частью автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-технолога.

**Результаты и их обсуждение**

Для алгоритмизации процесса, связанного с управлением теплового агре-

гата, в качестве инструментария использовались помеченные сети Петри. Граф операций (рис. 4) должен составляться с учётом конкретно определённых условий срабатывания датчиков.



**Рис. 4.** Граф операций производственного процесса с адаптивным трёхпозиционным регулированием

**Fig. 4.** Graph of production process operations with adaptive three-position control

Определяются параметры начального состояния объекта:  $\alpha_1$  – сигнал с органа управления;  $x_i$  – сигналы с датчиков температуры и датчиков положения;  $z_i$  – сигналы управления, подаваемые на ТЭНы, приводы задвижек, двигатели гидравлических толкателей и двигатель подъёмника;  $u_i$  – сигналы управления включением таймеров;  $\tau_i$  – сигналы с таймеров.

В этой сети каждая позиция соответствует определённой операции с начальной маркировкой в  $P_0$ .

В данной работе решалась задача построения адаптивной трёхпозиционной системы регулирования с адаптацией под нагрузку средней позиции при фиксированных крайних позициях статической характеристики. Для обоснования этого вида регулирования осу-

щественно анализ динамики нелинейного объекта с помощью метода припасовывания граничных значений и одновременно решалась задача, связанная с модификацией метода. Применение такого подхода для построения переходных характеристик и фазовых портретов является наиболее актуальным при исследовании систем управления с дискретным адаптивным регулированием.

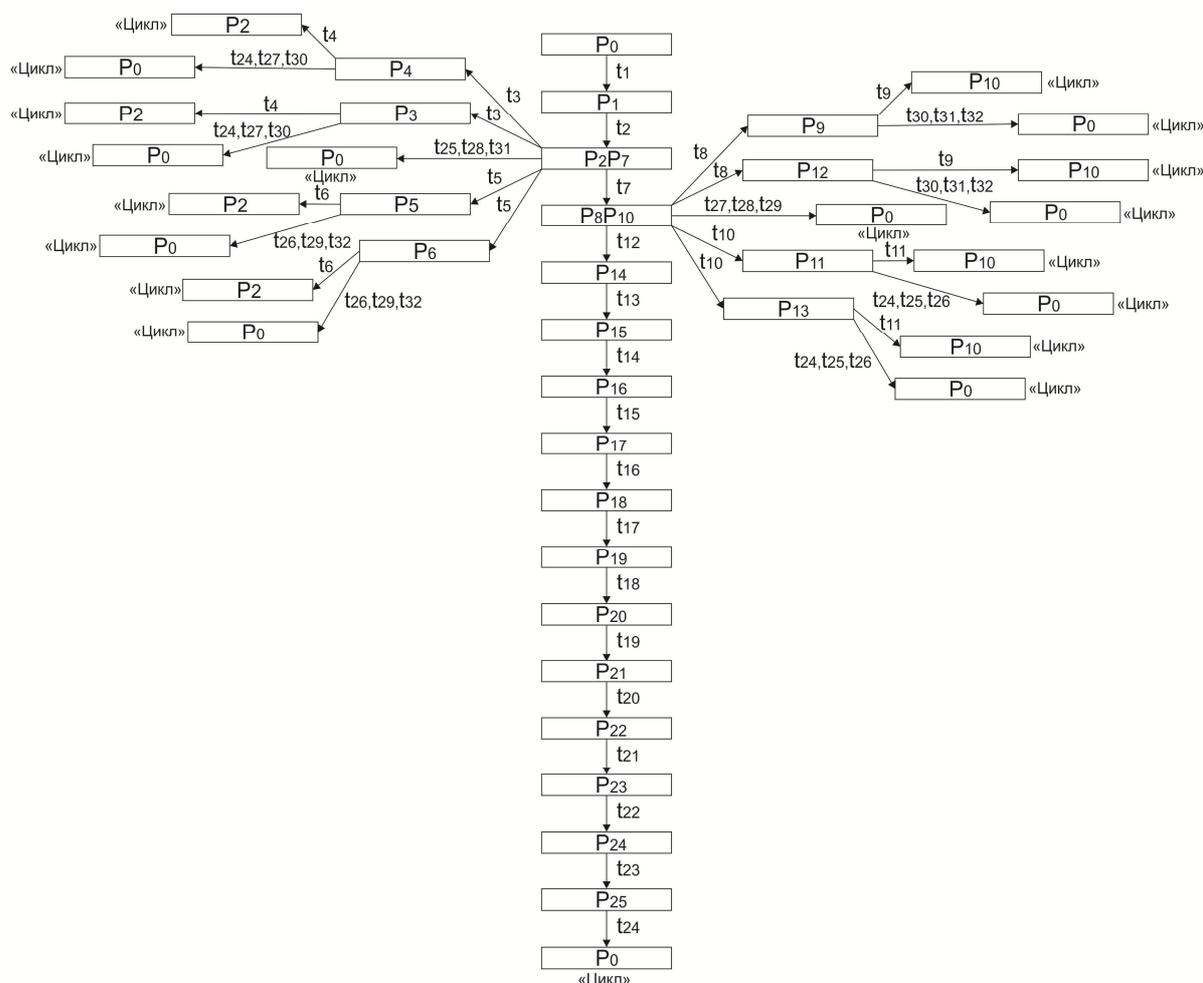
В случае применения дискретной адаптации выбор шага изменения средней позиции статической характеристики регулятора (шага адаптации) целесо-

образно делать, пользуясь следующим соотношением:

$$\Delta \leq (0,1 \div 0,05) (\text{ВП} - \text{НП}), \quad (1)$$

где  $\Delta$  – шаг адаптации; ВП – верхняя позиция статической позиции регулятора; НП – нижняя позиция статической позиции регулятора.

С помощью дополнительно разработанного дерева достижимых маркировок (рис. 5) осуществлялась проверка правильности построения графа операций, а также выполнялся анализ графа на соблюдение условий безопасности и живости сети.



**Рис. 5.** Дерево достижимых маркировок производственного процесса с адаптивным трёхпозиционным регулированием

**Fig. 5.** The tree of reachable markings of the production process with an adaptive three-position regulation

На следующей стадии разрабатывается программное обеспечение, реализующее логику функционирования системы управления. Программное обеспечение можно разбить на два уровня. Во-первых, нижний уровень, соответствующий рабочей программе контроллера, которая реализует разработанные алгоритмы, и, во-вторых, верхний уро-

вень, соответствующий человеко-машинному интерфейсу, который в свою очередь будет обеспечивать наглядное протекание производственного процесса для оператора. Мнемосхема двухъярусной туннельной печи представлена на рис. 6, блок-схема основного алгоритма – на рис. 7.

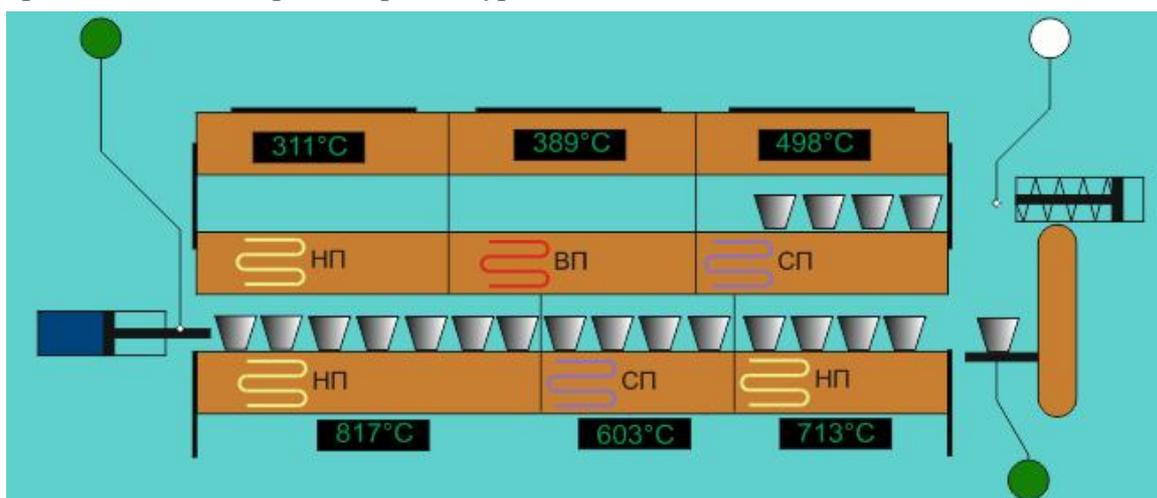


Рис. 6. Мнемосхема двухъярусной туннельной печи

Fig. 6. Mnemonic diagram of a two-tier tunnel furnace

Кроме этого, для определения основных параметров, с целью задания температурного режима работы теплового агрегата, спроектирована и разработана автоматизированная термодинамическая система экспресс-анализа пеностекольной шихты, функционирующая в режиме реального времени.

## Выводы

Изложенный подход к разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом производства пеностекольных блоков имеет обобщённый характер хотя и проиллюстрирован на применении к конкретно-

му объекту, поскольку допускает изменение как числа переменных  $x_i$ ,  $z_i$ , так и их функционального назначения, то есть вместо датчиков, толкателей, задвижек, значений параметров, например температуры, могут применяться другие элементы автоматики и другие физические переменные и их параметры. Таким образом, представленное решение носит методологический характер, демонстрирующий удобство использования модели в форме сети Петри и дерева достижимых маркировок для алгоритмизации и программирования логического контроллера, входящего в структуру системы автоматизации.

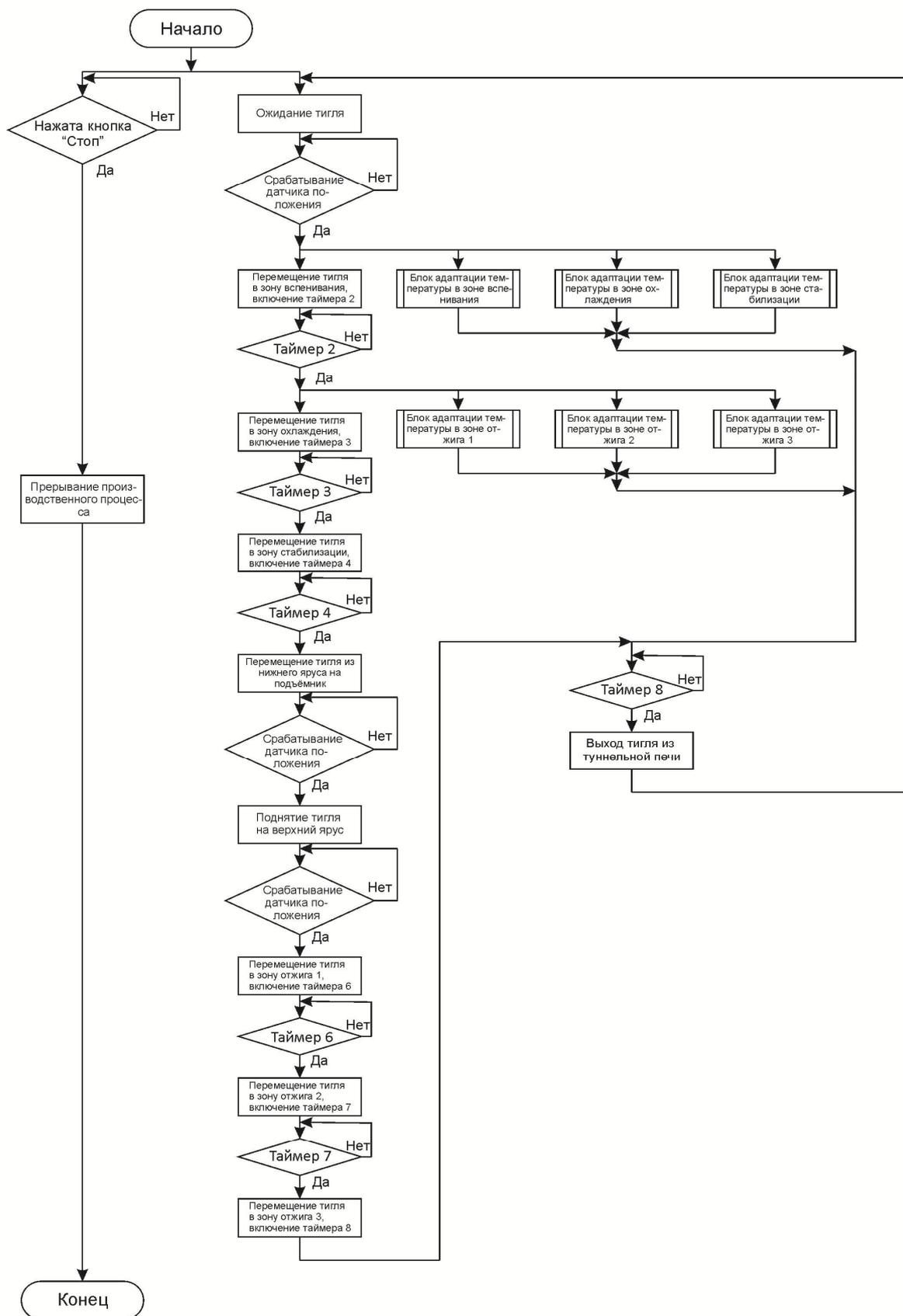


Рис. 7. Блок-схема основного алгоритма

Fig. 7. Block diagram of the main algorithm

### Список литературы

1. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.
2. Шилл Ф. Пеностекло. Производство и применение. М.: Стройиздат, 1965. 308 с.
3. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал / Н.И. Минько, О.В. Пучка, Е.И. Евтушенко [и др.] // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2013. №6. С.849-854.
4. Севостьянов В.С., Кононыхин В.С., Зубаков А.П. Техника и безотходная технология производства пеностекла // Строительство. 2000. №10. С.74-79.
5. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing // Glass and Ceramics. 2018. № 5-6 (75). P.171-176.
6. Рубанов В.Г., Величко Д.В., Луценко О.В. Математическая модель динамики температурного поля стеклоизделий сложной конфигурации при их отжиге // Стекло и керамика. 2018. №5. С.3-8.
7. Величко Д.В., Магергут В.З. Построение детерминированной и стохастической динамических моделей процесса нагрева пеностекольной шихты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. №2. С.90–94.
8. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Математическое моделирование процессов тепло- и влагопереноса при нагреве пеностекольной шихты // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. / отв. ред. В.С. Балакирев. Саратов: Изд-во СГТУ, 2010. Т.3. С.18-21.
9. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Математическое моделирование теплотехнологических процессов с межфазным переходом // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. / отв. ред. В.С. Балакирев. Саратов: Изд-во СГТУ, 2008. Т.3. С.53-55.
10. Городов Р.В. Экспериментальное определение зависимости температуропроводности пеностекольной шихты от температуры // Известия ТПУ. 2009. Т.314, №4. С.33-37.
11. Величко Д.В., Рубанов В.Г. Параметрическая идентификация термодинамической системы экспресс-анализа // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXXI Междунар. науч. конф. / отв. ред. А.А. Большаков. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2018. Т.3. С.22-26.
12. Магергут В.З., Величко Д.В., Костин С.В. Адаптивное трёхпозиционное регулирование в системе управления туннельной печи // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXIX Междунар. науч. конф. / общ. ред. А.А. Большаков. Саратов: Изд-во СГТУ, 2016. Т.4. С.44-47.

13. Магергут В.З., Величко Д.В., Андреев А.А. Автоматизация двухъярусной туннельной печи с использованием адаптивного трёхпозиционного регулятора // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XXVIII Междунар. науч. конф. / отв. ред. А.А. Большаков. Саратов: Изд-во СГТУ, 2015. Т.8. С.133-139.

14. Магергут В.З., Величко Д.В., Андреев А.А. Система автоматического перемещения тиглей в двухъярусной туннельной печи для производства пеностекольных блоков // Вестник ПНИПУ. 2015. №14. С.108-122.

15. Романников Д.О., Марков А.В. Об использовании программного пакета CPN Tools для анализа сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. 2012. №2 (68). С.105-116.

16. Порхало В.А., Бажанов А.Г., Магергут В.З. Информационные представления адаптивного трёхпозиционного алгоритма для его аппаратных и программных реализаций // Научные ведомости БГУ. 2011. №1 (96). Вып.17/1. С.161-168.

17. Автоматизированная система управления производством пеностекольных теплоизолирующих облицовочных блоков / В.Г. Рубанов, А.С. Кижук, О.В. Луценко [и др.] // Строительство. 2000. №10. С.93-97.

18. Ильюшин Ю.В. Проектирование системы управления температурными полями туннельных печей конвейерного типа // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникация. Управление. 2011. №3. С.67-72.

19. Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.

20. Пат. 2146033 Российская Федерация, МПК F27B 9/02, F27B 9/06. Туннельная печь-утилизатор / Волынский В.А., Ивахнюк В.А., Колчунов В.И., Кононыхин В.С., Мальцев А.Н., Новичков С.Г., Титаренко Ю.Д., Уваров В.А.; заявитель и патентообладатель «Белгород. технол. акад. строит. материалов». №99111279/03; заявл. 31.05.1999; опубл. 27.02.2000. 6 с.

## References

1. Demidovich B.K. *Penosteklo* [Foam glass]. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1975. 248 p. (In Russ.).

2. Shill F. *Penosteklo. Proizvodstvo i primeneniye* [Foam glass. Production and application]. Moscow, Strojizdat Publ., 1965. 308 p. (In Russ.).

3. Min'ko N.I., Puchka O.V., Evtushenko E.I. [et al.]. Penosteklo – sovremennyy jeffektivnyj neorganicheskiy teploizoljacionnyj material [Foam glass is a modern effective inorganic thermal insulation material]. *Fundamental'nye issledovanija. Tehniceskie nauki = Fundamental research. Technical Science*, 2013, no. 6, pp. 849-854 (In Russ.).

4. Sevost'janov V.S., Kononyhin V.S., Zubakov A.P. Tehnika i bezothodnaja tehnologija proizvodstva penostekla [Techniques and waste-free foam glass production technology]. *Stroitel'stvo = Construction*, 2000, no. 10, pp. 74-79 (In Russ.).

5. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing. *Glass and Ceramics*, 2018, no. 5-6 (75), pp. 171-176.

6. Rubanov V.G., Velichko D.V., Lutsenko O.V. Matematicheskaja model' temperaturnogo polja stekloizdelij slozhnoj konfiguracii pri ih otzhige [Mathematical model of temperature field dynamics in complex shaped glass articles during firing]. *Steklo i keramika = Glass and Ceramics*, 2018, no. 5, pp. 3-8 (In Russ.).

7. Velichko D.V., Magergut V.Z. Postroenie determinirovannoj i stohasticheskoj dinamicheskikh modelej processa nagreva penostekol'noj shihty [Construction of Deterministic and stochastic dynamic models of the foam glass charge heating process]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2015, no. 2, pp. 90-94 (In Russ.).

8. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Mathematical modeling of heat and moisture transfer processes during heating of foam glass charge]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2010, vol. 3, pp.18-21 (In Russ.).

9. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Mathematical modeling of heat-technological processes with interfacial transition]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2008, vol. 3, pp. 53-55 (In Russ.).

10. Gorodov R.V. Jeksperimental'noe opredelenie zavisimosti temperaturoprovodnosti penostekol'noj shihty ot temperatury [Experimental determination of the temperature dependence of the foam glass charge on the temperature]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnical University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 33-37 (In Russ.).

11. Velichko D.V., Rubanov V.G. [Parametric Identification of a thermodynamic rapid analysis system]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saint-Peterburg, 2018, vol. 3, pp. 22-26 (In Russ.).

12. Magergut V.Z., Velichko D.V., Kostin S.V. [Adaptive three-position control in the tunnel furnace control system]. *Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologijah* [Mathematical methods in engineering and technology]. Saratov, 2016, vol. 4, pp. 44-47 (In Russ.).

13. Magergut V.Z., Velichko D.V., Andreev A.A. [Automation of a two-tier tunnel furnace using an adaptive three-position controller]. *Matematicheskie metody v tehnikе i*

14. Magergut V.Z., Velichko D.V., Andreev A.A. Sistema avtomaticheskogo peremeshhenija tiglej v dvuhjarusnoj tunnel'noj pechi dlja proizvodstva penostekol'nyh blokov [Automatic crucible transfer system in a two-tier tunnel furnace for the production of foam glass blocks]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia = PNRPU Bulletin. Electrotechnic, Informational Technologies, Control Systems*, 2015, no. 14, pp. 108-122 (In Russ.).

15. Romannikov D.O., Markov A.V. Ob ispol'zovanii programmnoho paketa CPN Tools dlja analiza setej Petri [About using the CPN Tools software package for Petri net analysis]. *Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 2012, no. 2 (68), pp. 105-116 (In Russ.).

16. Porhalo V.A., Bazhanov A.G., Magergut V.Z. Informacionnye predstavlenija adaptivnogo trjohpozicionnogo algoritma dlja ego apparatnyh i programmnyh realizacij [Information representations of an adaptive three position algorithm for its hardware and software implementations]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta = Belgorod State University Scientific Bulletin*, 2011, no. 1 (96), pp. 161-168 (In Russ.).

17. Rubanov, V.G., Kizhuk A.S., Lucenko O.V. [et al.] Avtomatizirovannaja sistema upravlenija proizvodstvom penostekol'nyh teploizolirujushhih oblicovocnyh blokov [Automated production management system for foam glass thermal insulation facing blocks]. *Stroitel'stvo = Construction*, 2000, no. 10, pp. 93-97 (In Russ.).

18. Il'jushin Ju.V. Proektirovanie sistemy upravlenija temperaturnymi poljami tunnel'nyh pechej konvejernogo tipa [Design of the temperature field control System for conveyor type tunnel furnaces]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikacija. Upravlenie = St. Peterburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*, 2011, no. 3, pp. 67-72 (In Russ.).

19. Judickij S.A., Magergut V.Z. *Logičeskoe upravlenie diskretnymi processami* [Logical management of discrete processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 176 p. (In Russ.).

20. Volynskii V.A., Ivakhnyuk V.A., Kolchunov V.I., Kononykhin V.S., Mal'tsev A.N., Novichkov S.G., Titarenko Yu.D., Uvarov V.A. *Tunnel'naya pech'-utilizator* [Tunnel heat recovery furnace]. Patent RF, no. 99111279/03, 27.02.2000. (In Russ.).

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Рубанов Василий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: vgrubanov@mail.ru

**Vasiliy G. Rubanov**, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: vgrubanov@mail.ru

**Величко Дмитрий Валерьевич**, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: tk210@mail.ru

**Dmitry V. Velichko**, Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: tk210@mail.ru

**Бушуев Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: dmbushuev@gmail.com

**Dmitry A. Bushuev**, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, e-mail: dmbushuev@gmail.com