

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ МНОГОМЕРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА КЕРАМЗИТА

К.С. Галицков, С.Я. Галицков, О.В. Самохвалов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: maes@samgtu.ru; indexcitir@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются существующие проблемы управления технологическим процессом обжига керамзита определенной марки по прочности (или плотности) во вращающейся печи, обусловленные ограниченным количеством управляющих воздействий и неполнотой информации о температурном поле при «ручном» управлении печью. Предложено использовать многомерную систему автоматического управления обжигом керамзита, состоящую из трех взаимосвязанных каналов: управление объемной мощностью горелки, загрузкой сырца, скоростью вращения печи. Каждый из этих каналов управляет температурой керамзита в соответствующем сечении печи и таким образом формирует необходимую кривую обжига. Разработанная система позволяет не только стабилизировать прочность (или плотность) выпускаемого керамзита, но и обеспечивает сокращение времени технологического перехода печи при производстве керамзита с одной марки на другую.

Ключевые слова: вращающаяся печь, керамзит, объект управления с распределенными параметрами, система автоматического управления, робастность.

Введение

Современное строительное производство, в котором широко используется для разнообразных технологических целей керамзит [1, 2], предъявляет жесткие требования к постоянству величин прочности R (или плотности ρ) из широких известных диапазонов стандартных значений этих качественных параметров керамзита [1].

Процесс обжига керамзита во вращающейся печи, которая, как правило, имеет диаметр 2,5 м и длину 40 м, возможен при создании в ней такого тепलो-

Галицков Константин Станиславович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Механизация, автоматизация и электроснабжение строительства».

Галицков Станислав Яковлевич (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Механизация, автоматизация и электроснабжение строительства».

Самохвалов Олег Владимирович, преподаватель кафедры «Механизация, автоматизация и электроснабжение строительства».

го поля, при котором загруженный гранулированный сырец проходит последовательно четыре технологических этапа: сушка, нагрев, вспучивание и охлаждение. В силу известных обоснованных допущений [3, 4] температурный режим печи характеризуется обычно кривой обжига – распределением температуры T керамзита вдоль оси печи $T(z)$. Многочисленные экспериментальные исследования [4, 5] показывают, что в условиях известных ограничений, накладываемых главным образом характеристиками исходного глиняного сырья и конструктивными параметрами печи, прочность R (или насыпная плотность ρ) керамзита полностью определяется формой кривой обжига [6,7]. В связи с этим устойчивое промышленное производство керамзита с заданными показателями R (или ρ) напрямую зависит от стабильности поддержания кривой обжига в условиях действия известных возмущений, а технологический перевод печи при выпуске керамзита с одной марки на другую (в области допустимых характеристик исходного сырья) представляет собой решение задачи управления тепловым полем печи, обеспечивающим монотонный переход с одной кривой обжига на другую.

В известных технологических установках существенный разброс параметров выпускаемого керамзита, и прежде всего его R (или ρ), а также значительное время, затрачиваемое на смену технологического режима печи при переходе в производстве керамзита с одной марки на другую в условиях действующих возмущений (вариация влажности w сырца, изменение температуры окружающего воздуха и т. п.), обусловлены прежде всего ограниченным числом управляющих воздействий на процесс обжига в условиях «ручного» управления печью. Обжигальщик обычно регулирует объемную мощность Q_r газовой горелки и загрузку q_3 печи. В ряде случаев к ним может быть добавлено управление формой факела горелки [8]. Второй причиной нестационарности обжига является отсутствие постоянного контроля температуры керамзита по длине печи: обжигальщик, как правило, использует пирометр для периодического наблюдения температурного поля керамзита. В этих условиях управление обжигом керамзита по эвристическим алгоритмам далеко не всегда приводит к желаемым по технологическому регламенту результатам.

В работе [9] предложено использовать три управляющих воздействия на процесс обжига – объемную мощность горелки Q_r , загрузку печи сырцом q_3 , угловую скорость ω_n вращения печи.

Исследования технологического процесса обжига керамзита во вращающейся печи как объекта управления с распределенными параметрами, состояние которого определяется этими управляющими воздействиями [3], позволили выявить по длине печи три характерных сечения с координатами $z = z_F$, $z = z_A$ и $z = z_C$, температура керамзита в которых T_F , T_A и T_C максимально зависит, соответственно, от ω_n , q_3 и Q_r . Установлены аналитические зависимости прямых и перекрестных связей этих воздействий на T_F , T_A и T_C в рассматриваемых сечениях. Предложенное устройство [9] ориентировано на автоматическое управление температурой керамзита в этих сечениях.

Постановка задачи

Считаем, что из известного конечного множества S , включающего в себя m типов глиняного сырья, каждый элемент j которого определяется обобщенной характеристикой $S_j (j \in 1, \dots, m)$, технологически можно изготовить дискретное множество M стандартных марок $M_i (i \in 1, \dots, n)$ керамзита (со стандартными значениями прочности R_i или плотности ρ_i), обжигая его во вращающейся печи

заданной конструкции с допустимым диапазоном скорости ω_n и загрузкой q_3 , ограниченной объемной мощностью Q_F горелки. Допускаем, что в условиях этих ограничений построена в ортогональном пространстве $OT_F T_A T_C$ температурно-прочностная характеристика $R=f_1(T_F, T_A, T_C)$ [10], проблемно ориентированная на выбор рабочей точки $N_{3i}(T_{F3i}, T_{A3i}, T_{C3i})$, координаты которой представляют собой значения параметров вектора задающих сигналов $\bar{T}_{3i} = [T_{F3i}, T_{A3i}, T_{C3i}]^T$ многомерной САУ обжигом керамзита (рис. 1) заданной прочности R_{3i} в условиях минимально достижимых энергозатрат.

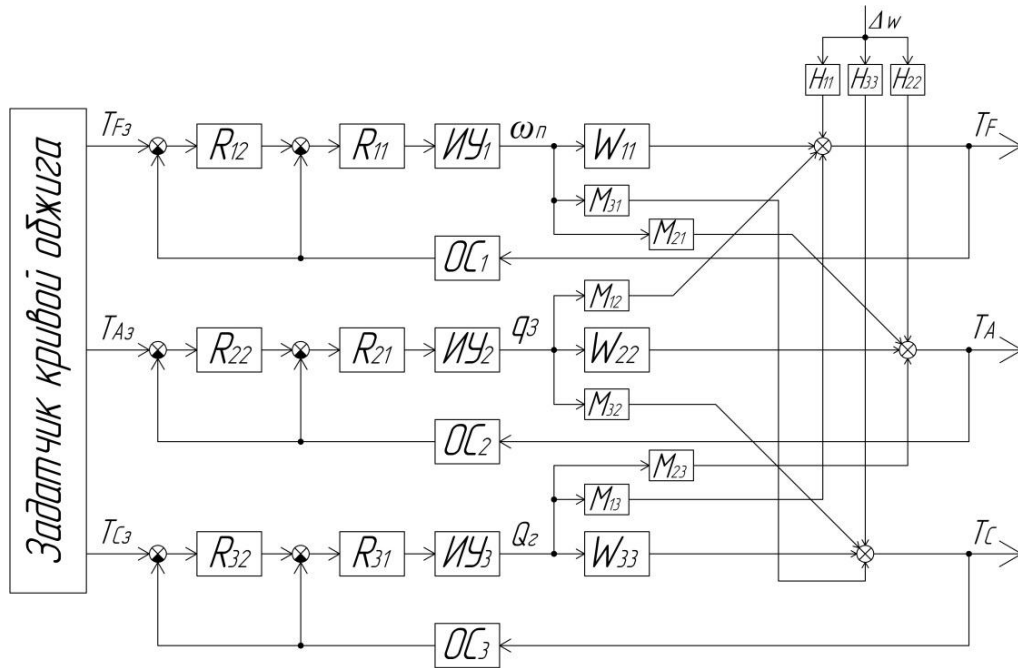


Рис. 1. Структурная схема системы управления:

- W_{11}, W_{22}, W_{33} – собственные передаточные функции;
- $M_{31}, M_{21}, M_{12}, M_{32}, M_{13}, M_{23}$ – передаточные функции межканальных связей по управлению;
- H_{11}, H_{22} и H_{33} – передаточные функции по отношению к возмущению;
- ИУ – исполнительные устройства; R_{ij} – передаточная функция регулятора,
- где i – номер канала многомерной системы управления ($i \in 1, 2, 3$),
- j – номер контура многомерной системы управления i -го канала САУ

В автоматизации обжига керамзита во вращающейся печи выделим две практически значимые задачи. Во-первых, стабилизацию значений температурного поля, заданного рабочей точкой N_{3i} в условиях действия основных возмущений: изменения влажности загружаемого сырья и вариации наружной температуры печи. Второй режим работы САУ – программное согласованное управление значением температуры $T_{F3i}, T_{A3i}, T_{C3i}$ керамзита при выполнении технологического перехода из точки N_{3i} в точку $N_{3(i+1)}$, соответствующую производству керамзита другой заданной марки по прочности. Для решения поставленных задач необходимо выполнить синтез многомерной (трехмерной) системы автоматического управления обжигом керамзита [9] (МСАУ ОК).

Решение задачи

Многомерная САУ обжигом керамзита включает в себя три разных по конструкции, принципу работы и технической реализации системы, обеспечивающие создание и автоматическое управление во вращающейся печи заданного распределения теплового поля $T(z)$. Первая система – это регулируемый электропривод скорости $\omega_{\text{п}}$ вращения печи; вторая представляет собой устройство автоматического управления расходом q_3 сырца керамзита, загружаемого в печь; третья обеспечивает управление объемной тепловой мощностью Q_r газовой горелки. Каждая система влияет, как показано в [3, 11, 12], на технологический процесс обжига керамзита.

Исследования динамики температурного поля печи в малых отклонениях от некоторого установившегося режима производства керамзита, например марки M_i , показали [3], что в этом случае от модели технологического процесса обжига керамзита как объекта с распределенными параметрами можно перейти к модели многомерного объекта с сосредоточенными параметрами с передаточной матрицей по отношению к вектору \bar{U} управляющих воздействий:

$$W_0^y(p) = \frac{\bar{T}(p)}{U(p)} = \begin{vmatrix} W_{11}(p) & M_{12}(p) & M_{13}(p) \\ M_{21}(p) & W_{22}(p) & M_{23}(p) \\ M_{31}(p) & M_{32}(p) & W_{33}(p) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

а по отношению к основному возмущению (влажность сырца) – с матрицей-столбцом:

$$H(p) = [H_1(p), H_2(p), H_3(p)]^T, \quad (2)$$

здесь $\bar{T}(p)$, $\bar{U}(p)$ – векторы выходных координат и управляющих воздействий,

$$\bar{T}(p) = [T_F, T_A, T_C]^T, \quad \bar{U}(p) = [\omega_{\text{п}}, q_3, Q_r]^T. \quad (3)$$

Основная трудность обеспечения требуемых режимов МСАУ ОК заключается в том, что параметры (коэффициенты передачи и время запаздывания) передаточной матрицы (1) существенно нестационарны [3]. Поэтому создаваемая МСАУ ОК должна быть робастной [13]. Применение в сепаратных каналах системы регуляторов Смита [14, 15] считаем нецелесообразным, поскольку значительное изменение величины запаздывания в объекте управления вызывает трудности с практической реализацией эталонной модели в этом регуляторе. Поэтому для решения задачи слабой зависимости показателей качества автоматического управления печью от вариации параметров объекта и от изменения внешних возмущений считаем целесообразным использовать во всех трех каналах многомерной САУ структуру многоконтурных систем с одной измеряемой координатой (МСОИК) [16] с типовыми ПИД-регуляторами.

Применительно к первому каналу – каналу управления температурой в сечении F , где инерционностью электромеханического привода печи можно пренебречь, поскольку постоянная времени T_{11} составляет $290 \div 555$ с и существенно превышает постоянные времени электропривода, – синтез регуляторов R_{11} и R_{12} двухконтурной системы можно выполнять в соответствии с методикой, разработанной в [16].

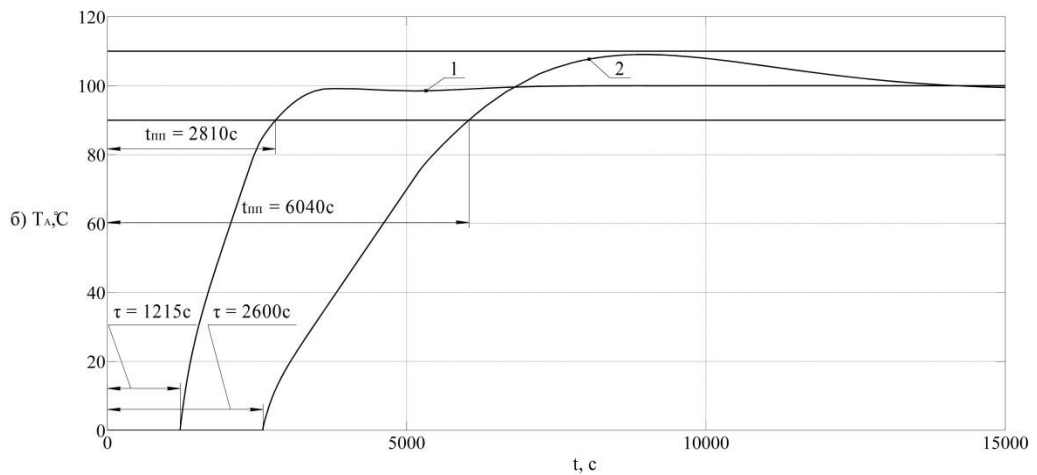
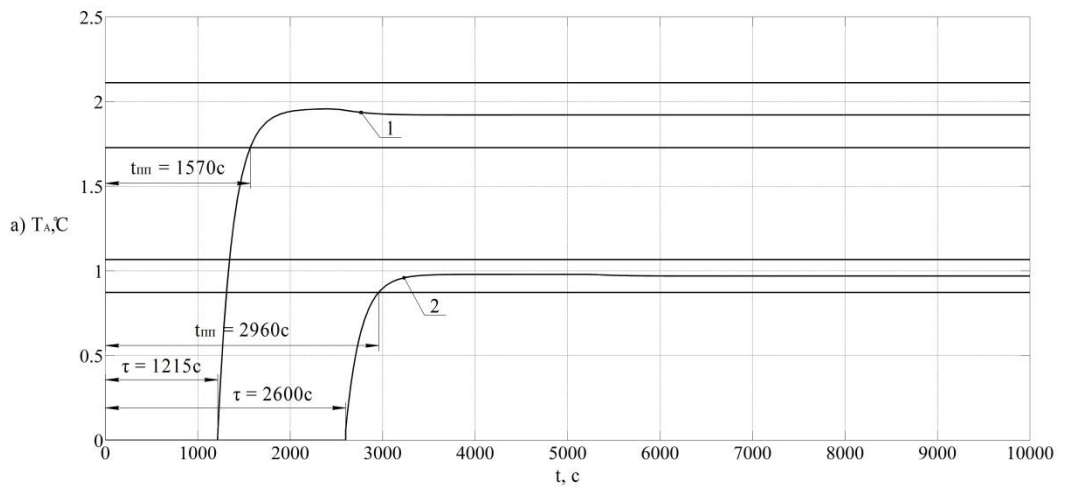


Рис. 2. Графики переходных процессов в канале А по управлению:
a – в первом контуре; *b* – во втором контуре;
 1 – с запаздыванием $\tau = 1215 \text{ c}$; 2 – с запаздыванием $\tau = 2600 \text{ c}$

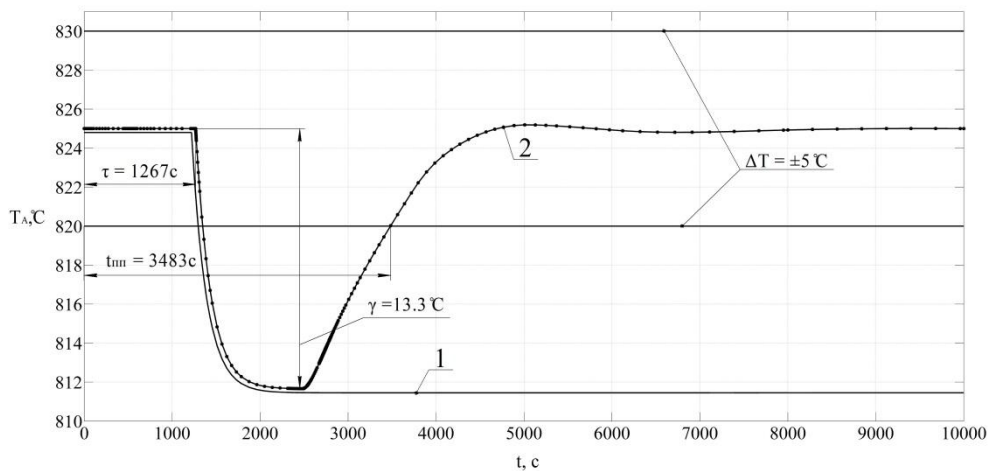


Рис. 3. Графики переходных процессов в канале А по возмущению:
 1 – в объекте управления; 2 – в системе управления

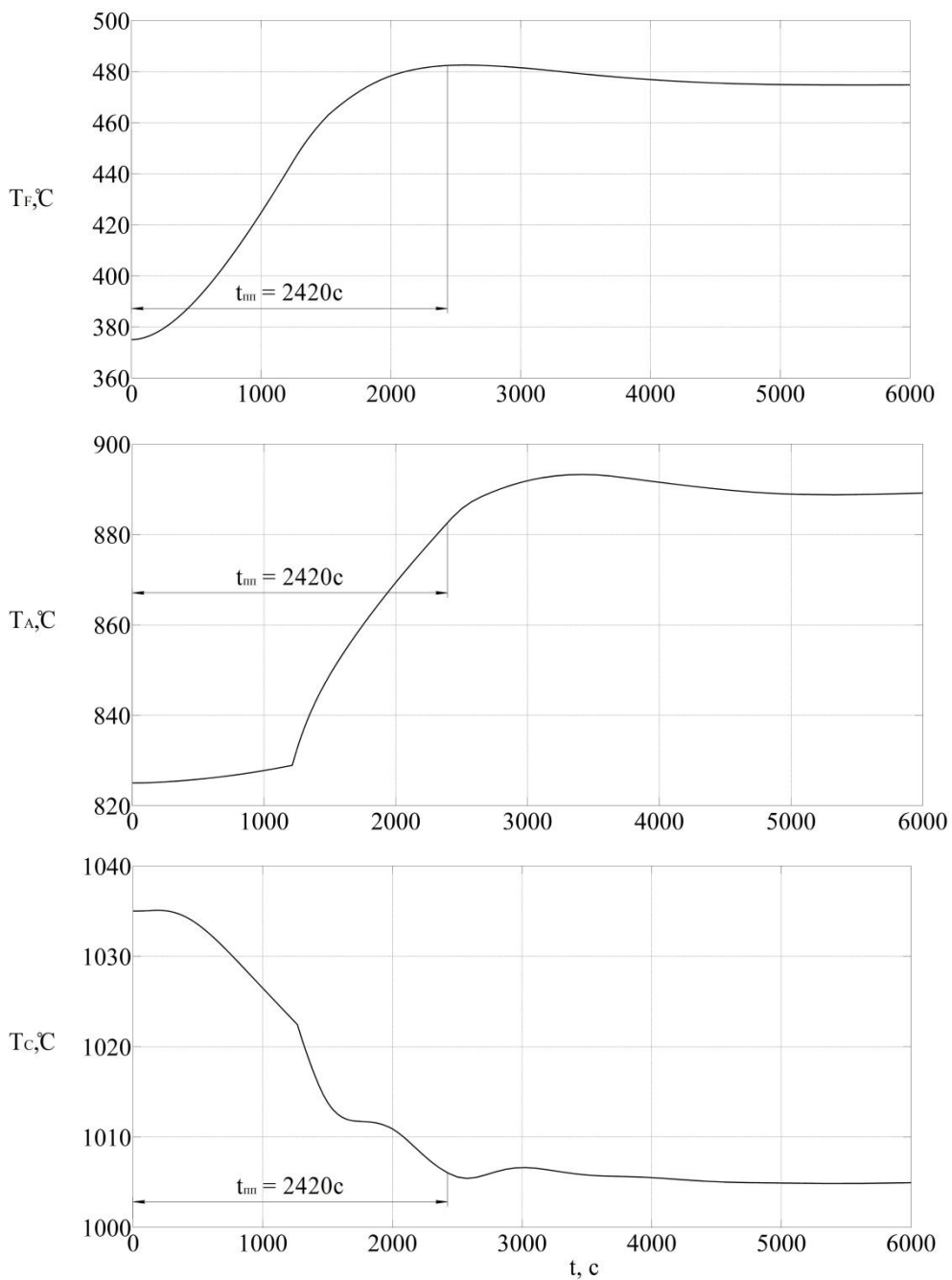


Рис. 4. Графики переходных процессов одновременного перехода с марки П200 на марку П250

Объекты управления каналов А и С содержат звенья запаздывания; синтез регуляторов первых контуров этих каналов выполним частотным методом с использованием критерия Найквиста [17, 18].

На созданной в программной среде Matlab МСАУ ОК выполнены вычислительные эксперименты по оценке показателей качества управления процессом обжига керамзита. Исследование трех сепаратных каналов разработанной многомерной системы показало, что при структурном синтезе достаточно использовать в каждом канале двух контуров МСОИК с типовыми ПИД-регуляторами. Это позволяет, во-первых, обеспечить робастность каналов в условиях существенной нестационарности параметров многомерного объекта. Во-вторых, достичь максимально возможного быстродействия и исключить статическую ошибку системы по отношению к управлению и возмущению.

В качестве примера на рис. 2 и 3 показаны кривые переходных процессов 1 и 2 в первом (рис. 2а) и втором (рис. 2б) замкнутых контурах системы управления температурой T_A (при максимальной вариации параметров объекта управления).

Установлено, что по быстродействию сепаратные каналы синтезированной многомерной САУ ОК существенно отличаются друг от друга (время переходного процесса по отношению к задающему воздействию для канала F составляет 808 с, для канала А – 2432 с, для С – 590 с). Поэтому для обеспечения монотонного изменения температурного поля печи при переходе от рабочей точки N_i к точке N_{i+1} используем в задатчике трехкоординатный формирователь вектора $\bar{T}_3(t) = [T_{F3}(t), T_{A3}(t), T_{C3}(t)]^T$ задающих сигналов. Инерционность формирователя определяется каналом с наименьшим быстродействием, применительно к рассматриваемой конструкции печи – это канал А.

Экспериментально доказано (рис. 4), что влияние межканальных связей повышает быстродействие многомерной САУ.

Выводы

1. Установлено, что применение трех управляющих воздействий (ω_p , q_3 и Q_T) на процесс обжига керамзита во вращающейся печи и использование многомерной САУ с вектором выходных координат $\bar{T} = [T_F, T_A, T_C]^T$, включающем в себя значения температуры керамзита в трех сечениях печи по ее длине, позволяет целенаправленно управлять кривой обжига по критерию производства керамзита заданной прочности в условиях минимизации энергозатрат.

2. Выполнен структурный синтез МСАУ ОК, где в каждом сепаратном канале используется двухконтурная многомерная система с одной измеряемой координатой (МСОИК). Показано, что такой подход позволяет обеспечить робастность системы, максимально достижимое быстродействие и астатизм по отношению к управляющим и возмущающим воздействиям.

3. Синтезирован алгоритм формирования вектора задающих сигналов, позволяющий обеспечить обжиг керамзита заданной прочности R_i и осуществить управляемый технологический переход при производстве с марки M_i на марку M_{i+1} .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Высокопрочный керамзит и керамдор для несущих конструкций и дорожного строительства // Строительные материалы. – М.: ЗАО «Сорм», 2010. – № 1 (661). – С. 9–11.
2. Горин В.М., Токарева С.А., Вытчиков Ю.С., Беляков И.Г., Шиянов Л.П. Применение стеновых камней из беспесчанного керамзитобетона в жилищном строительстве // Строительные материалы. – М.: ЗАО «Сорм», 2010. – № 2 (662). – С. 15–18.
3. Галицков С.Я., Галицков К.С., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. Моделирование обжига керамзита в печи с регулируемой скоростью вращения как объекта управления // Научное обозрение. – М., 2015. – № 7. – С. 227–237.
4. Онацкий С.П. Производство керамзита. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1987. – 333 с., ил.
5. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология. Кн. 1. – М.: Теплотехник, 2004. – 688 с.
6. Galitskov S.Ya., Fadeev A.S., Samokhvalov O.V. Defining limit values of temperature field in typical sections of a rotary kiln producing expanded clay at a given density // Procedia Engineering, XXIV R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (24RSP), TFOCE 2015, ISSN: 18777058. – Vol. 111. – 2015. – pp. 233–235, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.082>
7. Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V. Modelling Operating Area of Condition and Management of High Strength Bloating Clay, Stoving in a Rotary Kiln // Procedia Engineering, XXV P-R-S Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (25PRS), TFOCE 2016, ISSN: 18777058. – Vol. 153. – 2016. – pp. 609–612, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.204>
8. Патент на полезную модель № 93497, Газовая горелка. Горин В.М., Токарева С.А., Пышкин А.С. // Бюл. – №12 – 2009
9. Пат. 2554964 Способ обжига керамзита во вращающейся печи и устройство для его осуществления / Галицков С.Я., Самохвалов О.В., Фадеев А.С. // БИ. – 2015. – № 19.
10. Галицков К.С., Самохвалов О.В. Отображение прочностных характеристик керамзита в пространстве температурных режимов трех опорных сечений печи // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – № 9. – С. 91–94.
11. Galitskov S.Ya., Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimal control of ceramsite burning in a rotary kiln // MATEC Web Conferences, 5th International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”. – Vol. 86. – 2016. – pp. 1–5, <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20168604009>
12. Galitskov K.S., Samokhvalov O.V., Fadeev A.S. Optimization of burning production process of ceramsite with specified density // Environment. Technology. Resources, Volume 3 – Rezekne, 2017, Pages 57–61, <http://dx.doi.org/10.17770/etr2017vol3.2569>
13. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
14. Бажанов В.Л. Предиктор Смита в замкнутых системах управления с цифровыми регуляторами // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 15–20.
15. Ткачев Р.Ю., Бойко Н.З. Повышение качества предикторного ПИ-, ПИД-управления объектами с запаздыванием // Автоматика, телемеханика, связь: Сб. науч. трудов ДОНИЖТ. – 2017. – № 46. – С. 4–9.
16. Галицков С.Я., Галицков К.С. Многоконтурные системы управления с одной измеряемой координатой: Монография. – Самара: СГАСУ, 2004. – 140 с.
17. Ильясов Б.Г., Саитова Г.А., Халикова Е.А. Управление неустойчивыми объектами в составе многосвязной автоматической системы // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1–2.
18. Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматизация и телемеханика. – 2010. – № 6. – С. 109–118.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2018 г.

RESEARCH OF THE DYNAMICS OF THE MULTIDIMENSIONAL SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF CERAMSITE BURNING

K.S. Galitskov, S.Ya. Galitskov, O.V. Samokhvalov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. Existing problems of controlling the technological process of burning ceramsite of a certain grade in strength (or density) in a rotary kiln are considered, due to a limited number of control actions and incompleteness of information on the temperature field in the «manual» kiln control. It is proposed to use a multidimensional automatic control system for ceramsite burning consisting of three interconnected channels: control of the volumetric capacity of the burner, the loading of the raw material, and the speed of rotation of the kiln. Each of these channels controls the temperature of the ceramsite in the corresponding section of the kiln and thus forms the necessary burning curve. The developed system allows not only to stabilize the strength (or density) of the ceramsite manufacturing, but also ensures a shortening of the technological transition time of the kiln from the manufacture of ceramsite of one mark to another.

Keywords: rotary kiln, ceramsite, controlled object with distributed parameters, automatic control system, robustness.

*Konstantin S. Galitskov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Stanislav Ya. Galitskov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Oleg V. Samokhvalov, Teacher.*