

УДК 004.896, 666.9.04

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-4-0-6

Резников Н. Г.<sup>1</sup>  
Щербинина Н. В.<sup>1</sup>  
Забнин С.А.<sup>2</sup>

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ОБЖИГОМ  
ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

<sup>1</sup>) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

<sup>2</sup>) ООО «Интерактивные технологии и системы», Пресненская набережная, дом 8с1, г. Москва, 141400, Россия

*e-mail: 1335750@bsu.edu.ru, shcherbinina@bsu.edu.ru*

**Аннотация**

В работе рассмотрены основные аспекты управления технологическим процессом обжига цементного клинкера сухим способом производства. С помощью технологий системно-структурного моделирования разработана модель непосредственно технологического процесса, где показаны движения материальных и газовых потоков, основное технологическое оборудование и рычаги управления процессом. Также представлена обобщенная модель действий оператора при управлении обжигом клинкера. Рассмотрены основные сложности процесса управления при принятии решений по изменению регулировочных воздействий. В связи с этим представлена концепция модели интеллектуальной системы, поддерживающей обоснованный выбор оптимальных характеристик проведения процесса обжига цементного клинкера.

**Ключевые слова:** обжиг цементного клинкера, сухой способ производства, модель, системно-структурный анализ, управление процессом, интеллектуальная система.

UDC 004.896, 666.9.04

Reznikov N.G.<sup>1</sup>  
Shcherbinina N.V.<sup>1</sup>  
Zabnin S.A.<sup>2</sup>

**OPTIMIZATION OF CEMENT CLINKER FIRING CONTROL PROCESS**

<sup>1</sup>) Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

<sup>2</sup>) Interactive Technologies and Systems, 8S1 Presnenskaya naberezhnaya, Moscow, 141400, Russia

*e-mail: 1335750@bsu.edu.ru, shcherbinina@bsu.edu.ru*

**Abstract**

The paper discusses the main aspects of process control of cement clinker burning by the dry method of production. With the help of systems – structural modeling technologies, a model of the technological process itself has been developed, showing the movements of material and gas flows, the main process equipment and process control levers. Also presented is a generalized model of operator actions when controlling clinker burning. The main difficulties of the management process when making decisions on changing regulatory actions are considered. In this regard, the concept of an intelligent system model is presented that supports a reasonable choice of the optimal characteristics of the cement clinker burning process.

**Keywords:** Cement clinker burning, dry mode of production, model, system – structural analysis, process control, intelligent system.

**ВВЕДЕНИЕ**

Цементная промышленность играет важную роль в создании материально-технической базы современного общества. Основной статьей затрат в себестоимости цемента являются затраты на топливо при обжиге цементного клинкера. Нестабильность режима обжига ведет к снижению

качества продукции и увеличению издержек производства. Таким образом, для интенсификации процесса обжига клинкера, необходимо обеспечить его постоянную работу в заданном режиме.

Сухой способ производства, по сравнению с мокрым, позволяет сэкономить расход топлива на обжиг до 45%. Немаловажной составляющей является возможность полной автоматизации и удаленного управления технологического процесса.

В настоящее время с целью реализации принятой в России концепции ресурсо- и энергосбережения во многих отраслях промышленности внедряются современные системы автоматизированного управления производством и интеллектуальные информационные системы при управлении технологическими процессами.

На печах с существующим техническим комплексом по автоматизации все еще очень существенную роль в управлении играет человек, на которого возлагаются функции принятия решения на основе информации, формируемой на пульте управления, при этом возможны ошибки в силу человеческого фактора.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Системно-структурное моделирование процесса обжига клинкера сухим способом

Комплекс процессов, происходящих при обжиге цементного клинкера под воздействием тепловой энергии, весьма обширен и сложен. Процессы горения топлива, движения материальных и газовых потоков, теплообмена и физико-химических превращений сырьевой смеси тесно связаны между собой и каждый из них имеет решающее значение. Поэтому при управлении процессом обжига клинкера очень важно выбрать оптимальные параметры режима работы и поддерживать их постоянство.

На рис. 1 и рис. 2 представлена структура процесса обжига клинкера с точки зрения технологического процесса с использованием стандарта функционального моделирования IDEF 0.

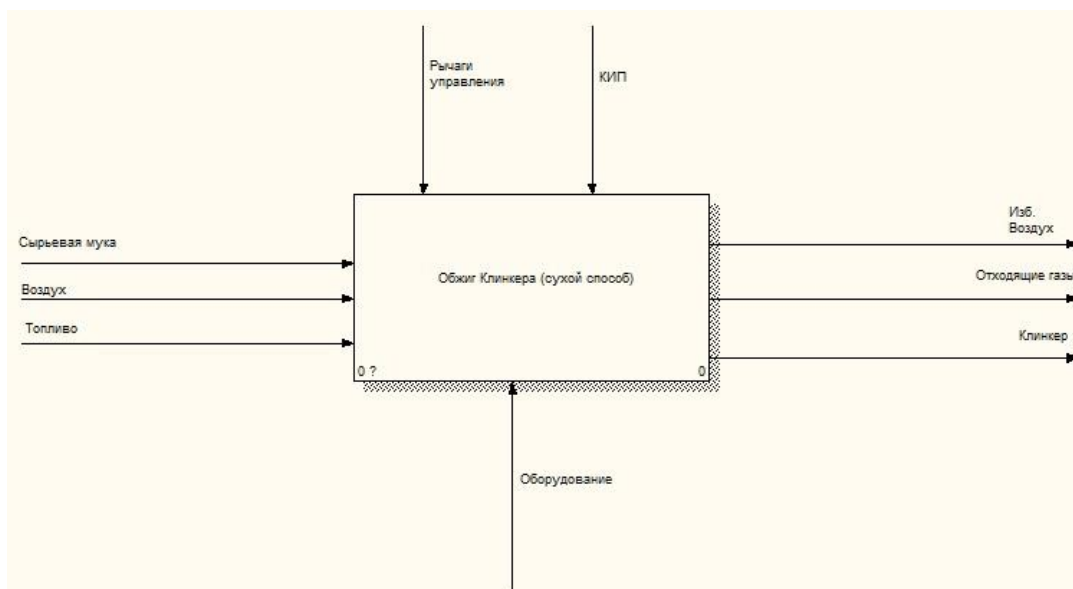


Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса обжига клинкера сухим способом (IDEF 0)

Fig. 1. Dry process clinker burning context diagram (IDEF 0)

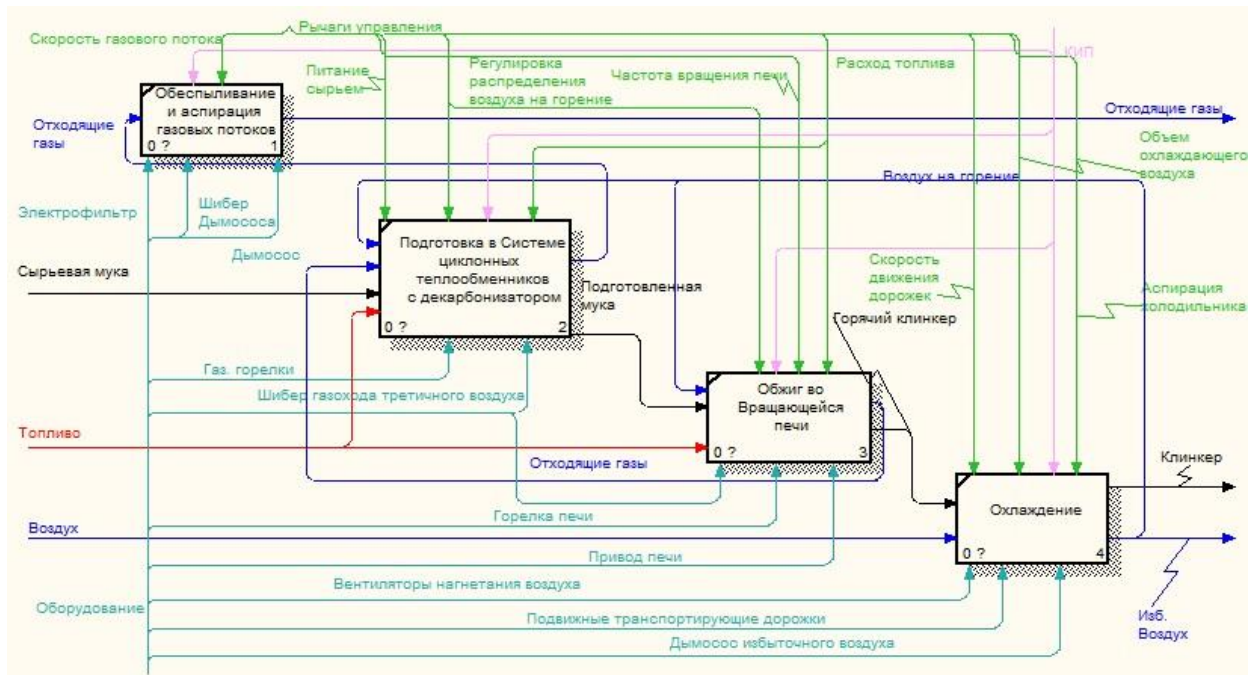


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции процесса обжига клинкера сухим способом (IDEF 0)  
Fig. 2. Dry process clinker burning decomposition diagram (IDEF 0)

Функциональные блоки декомпозиции тесно связаны между собой, и изменение режима работы одного из них непременно повлияет на режим работы всей системы. Оптимальная работа системы достигается за счет выбора режима работы оборудования средствами рычагов его управления, опираясь на данные контрольно-измерительных приборов и данные физико-химических анализов. С точки зрения технологического процесса, оптимальный режим работы подразумевает выход продукта заданного качества при минимальных удельных энергетических затратах и нормальным износом оборудования при работе.

### Особенности автоматизированного управления процессом обжига клинкера

Как уже отмечалось ранее, важную роль в управлении процессом обжига играет человек. Именно он принимает решение по тем или иным регулировочным воздействиям, на основании информации о протекании процесса. На рис. 3 и рис. 4 представлена обобщенная модель действий оператора при автоматизированном управлении процессом.

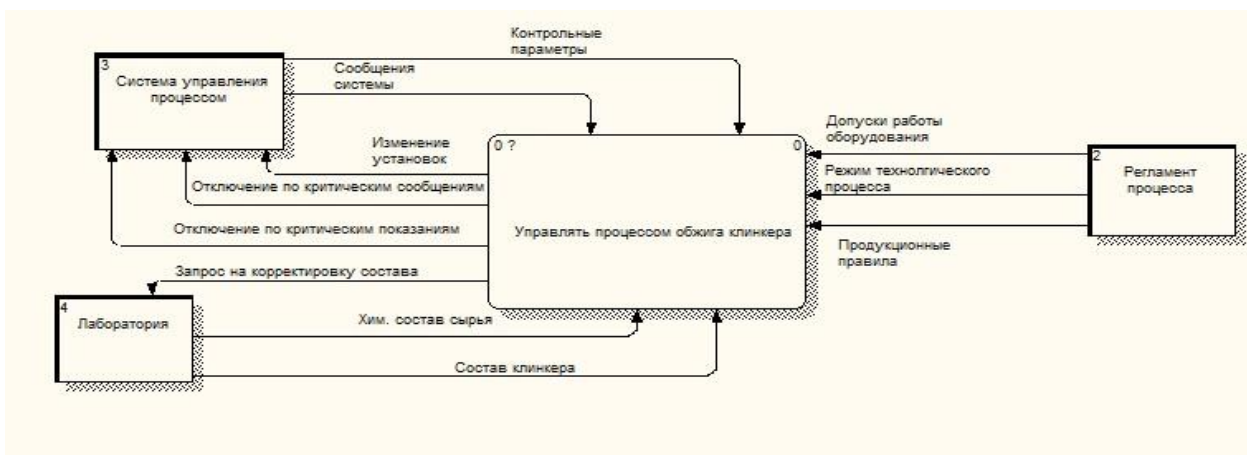


Рис. 3. Контекстная модель управления обжигом клинкера оператором (DFD)  
Pic. 3. Clinker burning control by operator context model (DFD)

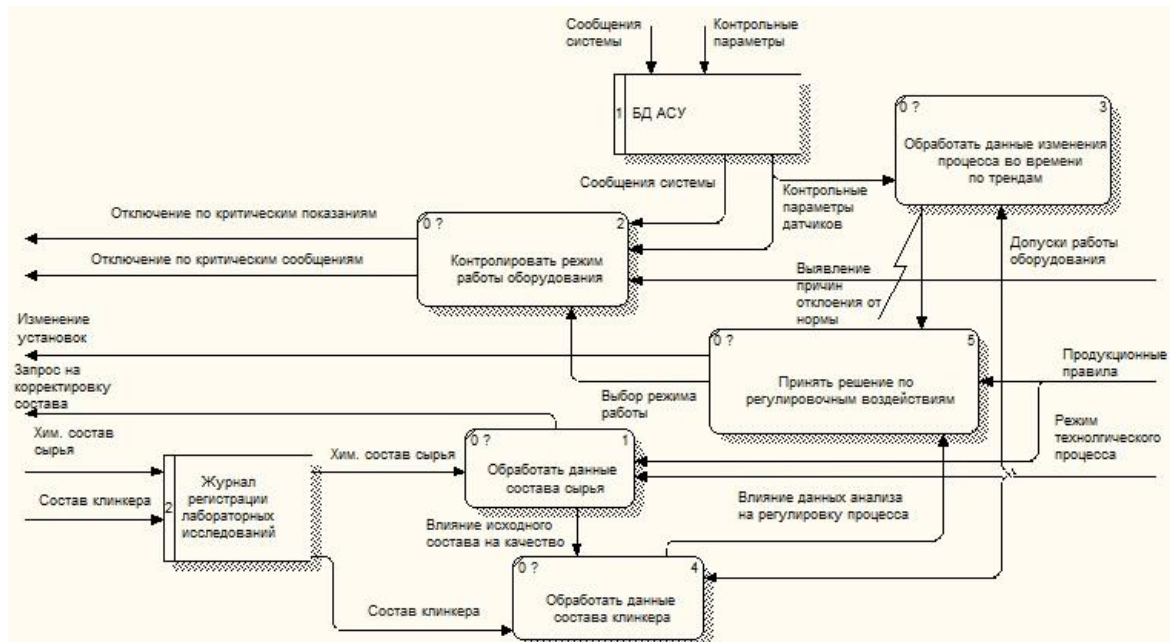


Рис. 4. Декомпозиционная модель управления обжигом клинкера оператором (DFD)  
 Pic. 4. Clinker burning control by operator decomposition model (DFD)

Контекстная модель показывает, что в ходе управления процессом происходит взаимодействие с системой управления и лабораторией с учетом регламента процесса. В системе управления непрерывно регистрируются все данные, приходящие с измерительных приборов, также эти данные сохраняются в базе данных. По всем данным можно построить графики изменения показаний во времени. На практике это существенно важный инструмент для анализа, как всего процесса в целом, так и его декомпозиций. Так как в режиме реального времени почти невозможно отследить тенденции показаний в ту или иную сторону или их постоянство. Помимо этого, в системе управления для каждого регистрируемого параметра предусмотрены так называемые пороговые значения. Существуют минимальные и максимальные предупреждающие пороговые значения, а также минимальные и максимальные отключающие пороговые значения. Когда тот или иной измеряемый параметр находится в предупреждающем интервале, на пульте формируется соответствующее сообщение. При достижении значений, лежащих в отключающем интервале, происходит отключение всех функционально связанных агрегатов и подпроцессов. Например, при падении скорости воздушного потока (разрежение) в одном из циклонных теплообменниках останавливается подача сырья, или при остановке подачи сырья по каким-либо причинам, происходит тушение газовых горелок в реакторе-декарбонизаторе.

Оператор каждый час получает и фиксирует в журнале данные химических анализов сырьевой муки (параметры материала на входе в процесс) и клинкера (параметры готового продукта на выходе). При отклонении состава исходного сырья оператор делает запрос на его корректировку путем изменения соотношения компонентов. Качество сырьевой муки в высокой степени влияет на качество готового продукта и на процесс обжига. Поэтому, при изменении исходного состава оператор должен принять решение о внесении соответствующих корректировок.

При принятии решений по регулировочным воздействиям, оператор руководствуется технологическим регламентом, учитывая нормативные документы по контролю качества, особенности технологического процесса, допуски по режиму работы оборудования. При изменении параметров процесса оператор использует некоторые производственные правила, основанные на базовых знаниях, опыте управления производством и т.д. Например, при наблюдении тенденции к охлаждению зоны спекания необходимо повысить расход газа, при росте показаний СО (угарный газ), в зависимости от других параметров необходимо либо снизить расход газа на горение, либо увеличить объем воздуха на горение (средствами работы холодильника или изменением общей аспирации).

Ниже в таблице одновременно представлены некоторые примеры отклонения процесса обжига цементного клинкера от нормы, их возможные причины возникновения, действия оператора для стабилизации процесса, а также действия оператора с учетом работы с предлагаемой поддерживающей АС. Таблица одновременно показывает сложность управления процессом, а также преимущества предлагаемой АС.

Таблица

**Краткий анализ причин отклонения от нормы процесса обжига и способы его нормализации**

Table

**A brief analysis of the causes of the violation of the clinker burning process and ways to stable it**

Возможные изменения параметров	Причины	Необходимые действия оператора	Действия оператора с учетом работы АС
Резкий рост температуры в реакторе-декарбонизаторе	- сбой работы в подаче питания (меньше, чем должно быть) - наблюдается «провал» материала, минуя ректор-декарбонизатор - самопроизвольное увеличение подачи топлива на горелки	Выявить причину отклонения: максимально быстро проверить текущие показания питания, разрежения на участках системы, текущий расход топлива, отследить их изменения по трендам, на основании вывода применить соответствующие регулировки	Система в реальном времени отслеживает изменение параметров питания, разрежения, расхода топлива, при отклонении о нормы выявляет причины изменения параметров, по изученным закономерностям Оператор применяет необходимые действия.
Появление и рост концентрации в составе отходящих газов СО	Недожог топлива: - нарушение скорости и количества газового потока. - излишняя подача топлива - неправильное распределение вторичного/ третичного воздуха/избыточного воздуха	Выявить причину отклонения: - максимально быстро проверить текущие показания разрежения на всех участках - изучить температуру избыточного воздуха - выявить по температурам на всех участках общее тепловое состояние системы - проверить характеристики работы двигателей дымососов и вентиляторов. На основании вывода принять соответствующие решения.	Система постоянно контролирует допустимые рабочие характеристики двигателей, предупреждает об их критических изменениях, контролирует изменение остальных параметров, выявляет влияние на изменение другими показателями, выдает соответствующие сообщения.
Готовый продукт неудовлетворительного качества (высокое содержание оксида кальция)	Недожог материала: плохая подготовка материала в теплообменниках и реакторе-декарбонизаторе - недостаточно тепла в зоне спекания печи - изменение состава сырья	- анализ оператором исходного состава сырья по данным лаборатории - выявить по температурам на всех участках общее тепловое состояние системы - проверить изменение в подаче питания.	Система функционально наделена прогнозом качества готового продукта на основании состава входного сырья с учетом текущего режима обжига. Предупреждает оператора о возможных отклонениях.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Опираясь на приведенную модель действий оператора, а также на практический опыт работы предприятия можно сделать вывод о том, что обжиг клинкера является сложным недостаточно формализованным объектом управления. Оператору необходимо часто принимать решения по регулировке этого процесса, ввиду отклонения некоторых параметров. Из приведенных примерах о производственных правилах можно увидеть, что добиться целевых показателей, зачастую, можно разными способами. Но это не означает, что выбор любого из них имеет место, в связи с тем, что процесс является инерционным, следовательно изменение одних параметров оказывает воздействие на другие параметры и подпроцессы, что может привести к нежелательным последствиям.

С другой стороны, оператор при работе с большим объемом информации не может охватить и своевременно обработать весь комплекс данных, поступающих от системы управления, а выделяет только несколько основных параметров, упуская из вида иные, по его мнению несущественные данные.

В связи с этим целесообразна разработка такой интеллектуальной информационной системы, которая поможет оператору производить комплексный анализ состояния технологического процесса в режиме реального времени, спрогнозировать характеристики на выходе из процесса с учетом входных данных и особенностей протекания процесса обжига.

С учетом вышеизложенного, а также принимая во внимание сложность математического описания процесса обжига клинкера, целесообразно использовать искусственную нейронную сеть в основе предлагаемой системы. Имея огромный массив данных, характеризующих протекание процесса, возможно обучить систему всем закономерностям, отклонениям от нормального хода технологического процесса, выявлению причин таких отклонений, а также прогнозированию качества готового продукта.

### **Список литературы**

1. Древицкий Е. Г., Добровольский А. Г., Коробок А. А. Повышение эффективности работы вращающихся печей. – М.: Стройиздат, 1990. – 224 с.
2. Дуда В. Цемент/ Пер. с нем. Е. Ш. Фельдмана: Под ред. Б. Э. Юдовича. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
3. Дуда В. Цемент: Электрооборудование, автоматизация, хранение, транспортирование: Справ. Пособие / Сокр. пер. с англ. Р. Д. Айтмуратова; Под ред. Б. Э. Юдовича и И. А. Прозорова. – М.: Стройиздат, 1987. – 373 с.
4. Классен В.К. Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печью//Цемент и его применение. – 2004. – №2. – С.39-42.
5. Нусс М.В., Классен В.К., Трубаев П.А. Модель процесса обжига цементного клинкера // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 6. – С. 58-60
6. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие / С.И. Маторин., О.А. Зимовец – Белгород: Изд-во НИУ «БелГУ», 2012. – 277 с.

### **References**

1. Drevitsky E. G., Dobrovolsky A. G., Korobok A. A. Improving the performance of rotary kilns. – М.: stroiizdat, 1990. – 224 p.
2. Duda V. Cement / Trans. with him. E. Sh. Feldman: Ed. B. E. Yudovich. – М.: stroiizdat, 1981. – 464 p.
3. Duda V. Cement: Electrical equipment, automation, storage, transportation: Right. manual / Abbr. per. from English R. D. Aytmuratov; Under ed. B. E. Yudovich and I. A. Prozorov. – М.: stroiizdat, 1987. – 373 p.
4. Klassen V.K. The basic principles and methods of control cement rotary kiln // Cement and its application. – 2004. – №2. – P.39-42.
5. Nuss, M.V., Klassen, V.K., Trubaev, P.A. Model of the process of roasting of a cement clinker // Fundamental research. – 2006. – № 6. – p. 58-60
6. System Theory and Systems Analysis: Study Guide / S.I. Matorin., O.A. Zimovets – Belgorod: Publishing House of the National Research University "BelSU", 2012. – 277 p.

**Резников Никита Григорьевич**, студент Белгородского государственного национального исследовательского университета» (НИУ «БелГУ»)

**Щербинина Наталья Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем

**Забнин Сергей Александрович**, инженер, ООО «ИТИС»

**Reznikov Nikita Grigorievich**, student of «Belgorod State National Research University» (NRU «BelSU»)

**Shcherbinina Natalia Vladimirovna**, Candidate of Technical Sciences, Docent of the Department of Information and Robotic Systems

**Zabnin Sergey Aleksandrovich**, engineer, Intelligent Technologies and Systems