

На правах рукописи

УМАРАЛИЕВ РАДЖАБ ШАМСОВИЧ

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБЖИГА
КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА В ТУННЕЛЬНОЙ
ПЕЧИ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2012

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные системы управления» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Научный руководитель: Кандидат технических наук, доцент
Исмоилов Мухамаджон Идибоевич,
доцент кафедры «Автоматизированные
системы управления» МАДИ

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Илюхин Андрей Владимирович,
профессор кафедры «Автоматизация
производственных процессов» МАДИ

Кандидат технических наук, профессор
Тихонов Анатолий Федорович,
профессор кафедры «Электротехника и
электропривод» Московского
государственного строительного
университета (МГСУ)

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
материалов, конструкций и новых технологий (НИИ МК и НТ),
г. Москва.

Защита состоится 16 мая 2012 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д.212.126.05 при Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Московский автомобильно-дорожный государственный технический
университет (МАДИ)» по адресу:

125319, ГСП А-47, Москва, Ленинградский пр., 64.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
автомобильно-дорожного государственного технического университета
(МАДИ).

Автореферат разослан 13 апреля 2012 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять
в диссертационный совет университета и по электронной почте:
uchsovet@madi.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Михайлова Н.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Растущий спрос на качество и объемы производства керамического кирпича предполагает использование новейших передовых технологий, методов и способов производства, а также совершенствование технологии существующих производств, улучшение качества выпускаемой продукции.

В производстве керамического кирпича наиболее сложным, энергоемким и ответственным процессом является обжиг, так как именно во время него окончательно формируются свойства кирпича, определяющие понятие – качество готовой продукции. Кроме того что, обжиг является основным потребителем тепловой энергии, он также становится и источником теплового загрязнения окружающей среды.

Необходимо отметить, что процесс обжига включает как измеряемые механические и гидрофизические показатели (прочность, морозостойкость и водопоглощение), так и визуальные дефекты (трещины, оплавление, пережог). Поэтому важнейшим условием экономичной, высокопроизводительной и высококачественной тепловой обработки изделий строительной керамики является строгое соблюдение установленного теорией и практикой теплового режима, т.е. определенное распределение температуры, влажности, состава газов теплоносителя, а также скорости его движения в агрегате.

Поэтому рациональная организация составляющих процессов, автоматизация управления обжигом с использованием современных методов, средств и технологий является актуальной задачей.

Цель работы. Целью диссертационной работы является повышение эффективности производства и качества керамического кирпича за счет использования методов, алгоритмов и средств совершенствования технологического процесса.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются следующие **основные задачи**:

- анализ объекта исследования и технологий производства керамического кирпича;
- анализ и формализованное описание методов и моделей технологического процесса обжига керамического кирпича;
- разработка имитационной модели технологического процесса обжига керамического кирпича;

- разработка алгоритма управления технологическим процессом обжига керамического кирпича.

Объектом исследования является технологический процесс обжига керамического кирпича.

Методы исследования. Теоретической основой диссертационной работы являются общая теория систем, методы оптимизации, случайные процессы, имитационное моделирование, исследование операций, системный анализ.

Научная новизна. Научную новизну работы составляют методы, модели и алгоритмы автоматизации технологического процесса обжига керамического кирпича, расчета температуры газовой смеси и моделирования теплового баланса печи.

На защиту выносятся:

- результаты анализа способов и технологий производства керамического кирпича;
- формализованное представление процесса обжига керамического кирпича;
- имитационная модель технологического процесса обжига керамического кирпича;
- алгоритм управления процессом обжига керамического кирпича, обеспечивающий расчет температуры газовой смеси и расчет температуры материала.

Достоверность научных положений, рекомендаций и выводов

Обоснованность научных положений, рекомендаций и выводов, изложенных в работе, определяется корректным использованием современных математических методов, согласованным сравнительным анализом аналитических и экспериментальных зависимостей. Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения разработок в ряде крупных организаций.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Научные результаты, полученные в диссертации, доведены до практического использования. Проведены экспериментальные исследования модели с целью выдачи рекомендаций по организации технологического процесса обжига керамического кирпича. Разработанные методы и алгоритмы прошли апробацию и внедрены для практического

применения на кирпичном заводе г. Душанбе (Республика Таджикистан), а также используются в учебном процессе на кафедре «АСУ» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) и на кафедре «АСОИ и У» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими (Республика Таджикистан). Результаты внедрения и эксплуатации подтвердили работоспособность и эффективность разработанных методов.

Апробация работы

Содержание разделов диссертации докладывалось и получило одобрение:

- на научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах Республики Таджикистан (г. Душанбе, 2009 – 2011 гг.);
- на научно-методических конференциях МАДИ (Москва, 2009 – 2012 гг.);
- на заседании кафедры «Автоматизированные системы управления» МАДИ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе диссертации рассмотрены технологии производства керамического кирпича.

Производство керамического кирпича представляет собой непрерывный технологический процесс, включающий несколько стадий (компоновка шихты, переработка шихты, формование бруса, нарезание бруса, сушка кирпича-сырца, обжиг кирпича-сырца). Основным сырьем для приготовления кирпича являются легкоплавкие глины (лёссовидная глина) – горные землистые породы, способные при затворении водой образовывать пластическое тесто, превращающееся после обжига при 950 - 1100°С в камнеподобный материал. Для улучшения природных свойства глины – уменьшения общей усадки, чувствительности к сушке и обжигу, улучшения формовочных свойств – широко применяют добавки (до 30%).

При производстве керамического кирпича используется способ полусухого формования (прессования) и способ пластического формования, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

Способы формования различаются по количеству влаги, содержащейся в формовочной массе. Для глин рыхлых и средней плотности с влажностью не выше 23-25% применяют пластический

способ; для глин плотных, плохо поддающихся увлажнению и обработке с низкой карьерной влажностью менее 14-16% – полусухой способ.

Способ полусухого прессования предусматривает предварительное высушивание сырья, последующее измельчение его в порошок, прессование сырца в пресс-формах при удельных давлениях, в десятки раз превышающих давление прессования на ленточных прессах. За счет малой начальной влажности и поштучного формования кирпич полусухого прессования имеет более правильную форму и размеры.

Преимущества полусухой технологии заключаются в том, что прессованный кирпич-сырец укладывается непосредственно на печные вагонетки и на них высушивается в туннельных сушилках, или же, минуя предварительную досушку, непосредственно поступает на обжиг. Комплексная механизация производства осуществляется проще, чем при методе пластического формования. Однако технология полусухого прессования требует более совершенной системы аспирации на трактах приготовления и транспортирования.

Отличие полусухой технологии от пластической заключается в упрощенной схеме приготовления сырьевой смеси. Полусухое прессование облегчает одну из наиболее сложных и длительных стадий технологического процесса – сушку. Получаемый кирпич имеет более четкие грани и углы, что позволяет использовать его как облицовочный материал.

Характерные *недостатки* технологии полусухого прессования – повышенное пылеобразование и как следствие, необходимость в системе пылеулавливания. Кроме того, при этом не обеспечивается гомогенизация сырья, что может снизить прочность и морозостойкость изделий.

Способ пластического формования - это классический способ производства кирпича, основанный на формовании при влажности 23 – 25%. Технологическая схема такого производства, несмотря на большую сложность и длительность, более распространена в промышленности стеновой керамики. При пластическом формовании в глину вводится значительное количество влаги, в результате чего, масса приобретает пластические свойства. Обобщенная схема технологических этапов способа пластического формования показана на рис.1.

Технология пластического формования является наиболее широко применяемой и обладает такими *преимуществами* как отсутствие пылеобразования и высокое качество керамических изделий. Качественный кирпич пластического формования прочен, износостоек,

долговечен и экологически безопасен. Способ пластического формования позволяет выпускать изделия в широком ассортименте, более крупных размеров, сложной формы и большей пустотности. В отдельных случаях предел прочности при изгибе и морозостойкость таких изделий выше, чем у изделий, полученных способом полусухого прессования из того же сырья. А также при пластическом способе подготовка сырья несколько проще и экономичней, меньше энергоемкость, оборудование более надежно и просто в обслуживании.

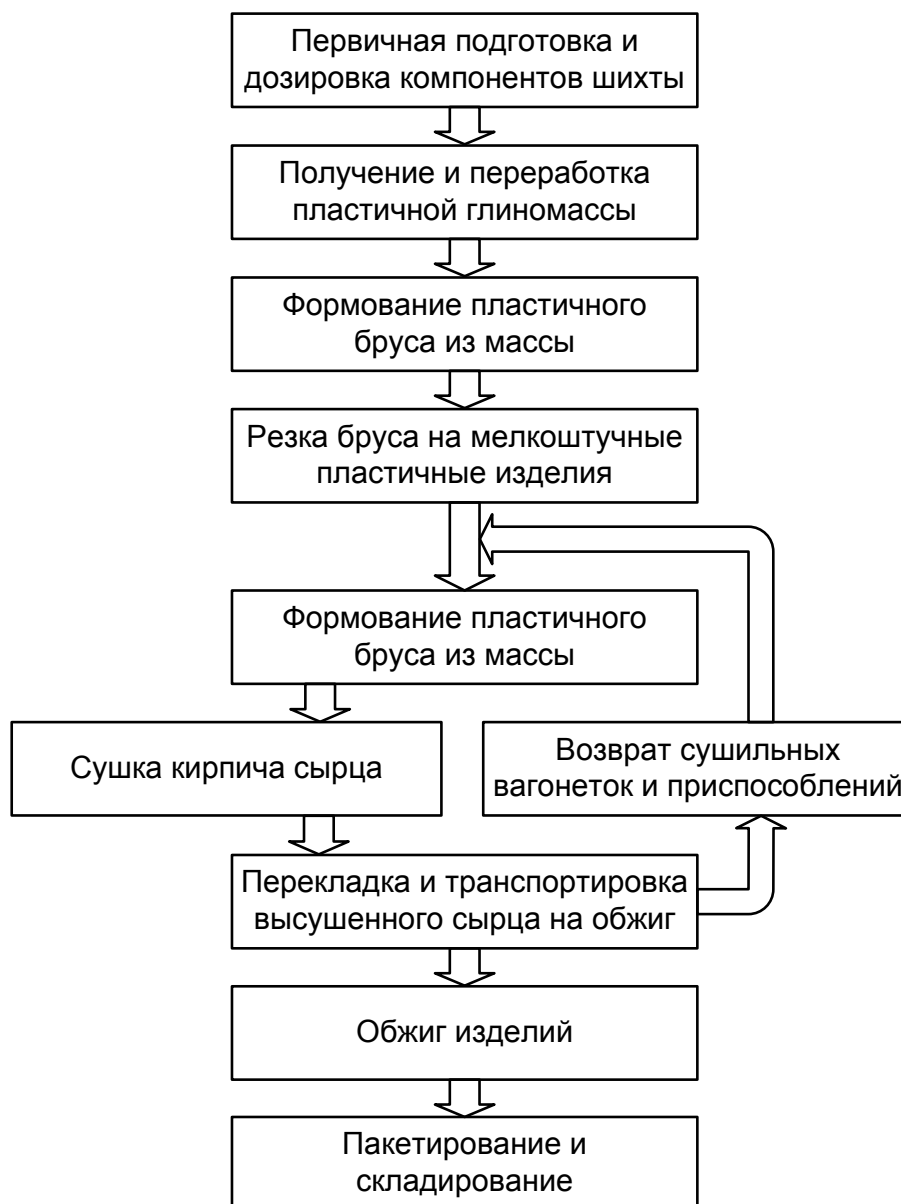


Рис.1. Технологические этапы способа пластического формования

Недостатком способа пластического формования является большая длительность технологического цикла за счет процесса сушки сырца, продолжающегося от 1 до 3 суток. Низкая прочность формованного сырца,

особенно пустотелого, большая усадка материала при сушке затрудняет возможность механизации.

К основным свойствам керамических стеновых материалов относятся прочность, плотность, водопоглощение (водостойкость) и морозостойкость. Эти свойства в значительной степени зависят от организации тепловых процессов.

Основными видами тепловых процессов, связанных с значительной частью затрат производства, являются сушка и обжиг, при этом наиболее существенные затраты приходятся на тепловое оборудование и топливо для обжига при высоких температурах (950-1100°C).

Обжиг – это последний и самый ответственный процесс в технологии производства кирпича, так как именно во время него окончательно формируются свойства, определяющие качество кирпича. К таковым принято относит как измеряемые механические и гидрофизические показатели – прочность, плотность, морозостойкость и водостойкость и т.п., так и визуальные дефекты – трещины, оплавление, пережог и др.

При обжиге изделия формируется структура материала, происходит спекание керамики, в результате чего кирпич - сырец превращается в твердое и прочное тело, стойкое против механических, физических и химических воздействий.

Обжиг производится в основном в печах непрерывного действия (кольцевые и туннельные); печи периодического действия используются лишь на заводах малой мощности.

Туннельные печи отличаются от кольцевых тем, что позволяют создать поточность производства и полностью механизировать и автоматизировать весь технологический процесс по обжигу кирпича. Они относятся к печам с подвижным составом и работают по принципу противотока: обжигаемые изделия перемещаются на вагонетках по сквозному туннелю навстречу теплоносителю. Вагонетки с изделиями по рельсовому пути подаются гидравлическим толкателем через определенные промежутки времени. Каждая вагонетка, пройдя всю длину туннеля, выдается из печи с другого конца при каждом проталкивании. Таким образом, создается непрерывное перемещение вагонеток в печи, постепенный подогрев, обжиг и охлаждение изделий, находящихся на поду вагонетки.

Цикл обжига состоит из периодов нагревания, выдержки при высокой температуре (спекания) и охлаждения, каждый из этих периодов

характеризуется определенными физико-химическими процессами в керамической массе.

Рабочее пространство печи можно разделить на три основные зоны (рис.2): подогрева (подготовки), обжига и охлаждения.

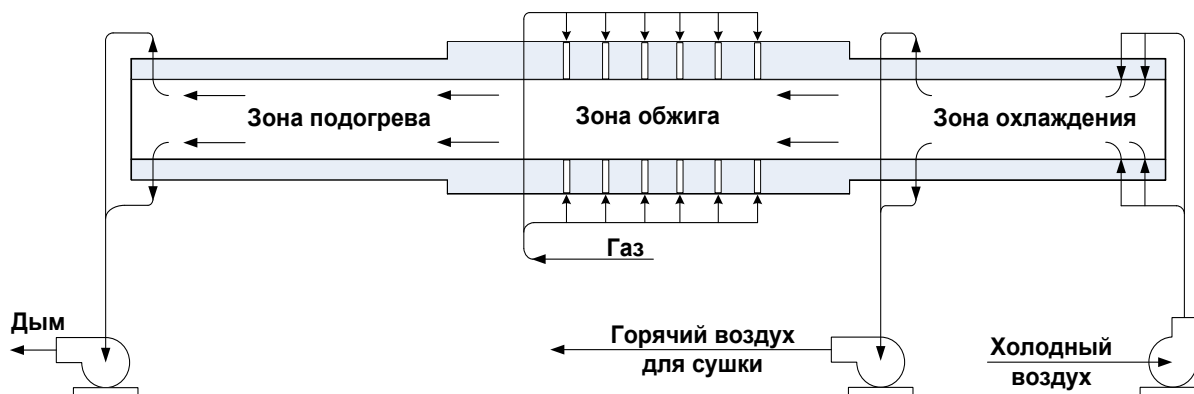


Рис.2. Схема технологии обжига в туннельной печи

Составляющие процесса обжига: выделение механической и адсорбированной воды; окисление органических примесей; дегидратация глинистых минералов; разложение карбонатов, сульфатов; реакции в твердой фазе с образованием новых соединений; реакции с участием жидкой фазы и образованием после охлаждения стекловидной фазы; полиморфные превращения кварца; спекание.

Протекающие реакции:

- окисление органических примесей ($t = 300 - 400^{\circ}\text{C}$);
 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
- дегидратация глинистых минералов ($t = 450 - 900^{\circ}\text{C}$);
 $\text{Al}_2 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2 [\text{Si}_2\text{O}_5] (\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
- декарбонизация и десульфуризация ($t = 650 - 900^{\circ}\text{C}$);
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
 $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$
 $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{CaO} + \text{SO}_3$
- образование новых кристаллических фаз ($t = 920^{\circ}\text{C}$);
 $2\text{Al}_2 [\text{Si}_2\text{O}_5] \text{O}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{Al}_4\text{O}_2 + \text{SiO}_2.$

С учетом протекающих процессов, связанных с выделением газообразных продуктов, изменением объема заготовок и т. п., формируется режим обжига: 1) удаление воды – «досушка» (до 200°C); 2) дегидратация – «на дыму» ($200 - 700^{\circ}\text{C}$), полиморфные превращения (β – кварца в α – форму); 3) основной – «взвар» ($700 - 950 - 1000^{\circ}\text{C}$), спекание; 4) охлаждение – «закал».

Важнейшей составляющей многих керамических масс является кристаллический кремнезем, при нагревании он претерпевает модификационные превращения, схема которых приведена на рис.3.

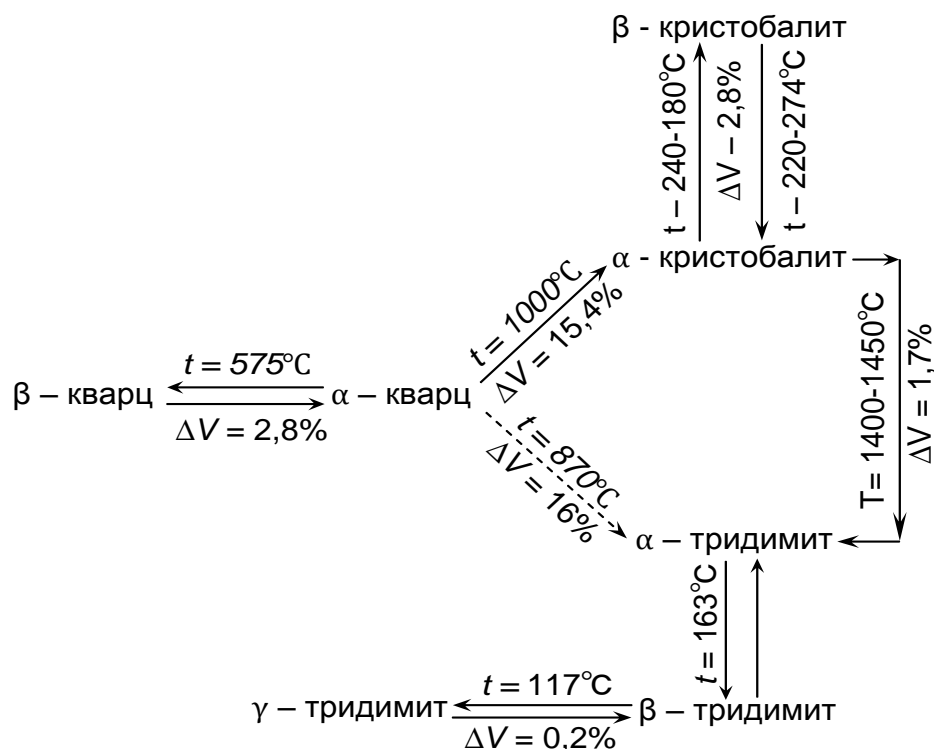


Рис.3. Модификация кремнезема при обжиге

Регулирование распределения продуктов горения и воздуха позволяет применять широкую автоматизацию процессов подогрева, обжига и охлаждения изделий, обеспечивающую получение наилучших технико-экономических показателей работы этих видов печей.

Во второй главе представлено описание математических моделей процесса обжига керамического кирпича.

В качестве исходных приближений при составлении математической модели принято:

- длина туннеля печи во много раз превышает его поперечное сечение, печь подразделяется на 46 рабочих зон;
- к окончанию времени пребывания изделия в рабочей зоне его температура выравнивается по объему и сравнивается с температурой газа;
- температура газа зависит от времени и в пределах одной зоны одинакова.

В целом, модели процессов обжига должны соответствовать законам термодинамики, сохранения энергии, тепло- и массообмена.

К термодинамике явлений происходящих в рабочем пространстве печи и приводящих к изменению обжигаемого материала, относятся:

- процесс горения топлива;
- процессы внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи и на поверхности обжигаемого материала (кирпича-сырца);
- процесс движения газов;
- различные виды тепло- и массообмена;
- химические процессы;
- процессы внутреннего теплообмена в массе материала.

Следует отметить, что на тепловой баланс печи оказывают влияние следующие показатели:

- мощность газовых горелок как основного источника теплоты для всего процесса обжига;
- направление движения дымовых газов и воздуха как вдоль, так и поперек сечения печи;
- потери тепловой энергии через конструкции стенки печи в окружающую среду, рис.4.

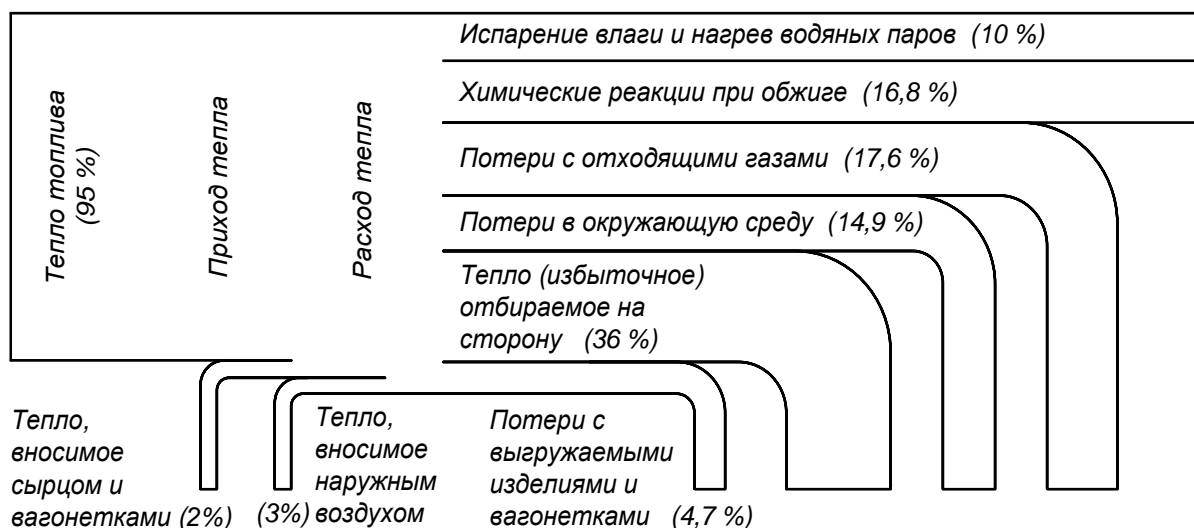


Рис.4. Тепловой баланс туннельной печи

Расход топлива на обжиг изделий определяется по совместному тепловому балансу зон подогрева и обжига. Приходную часть теплового баланса туннельной печи составляют:

1. Тепло, выделяющееся в процессе горения топлива:

$$Q_1 = Q_p^h x, \quad (1)$$

где: x – искомый расход топлива.

2. Физическое тепло топлива:

$$Q_2 = x C_T t_T, \quad (2)$$

где: C_T – теплоемкость; t_T – температура топлива.

3. Тепло, вносимое в зону обжига нагретым воздухом, поступающим из зоны охлаждения обожженных изделий:

$$Q_3 = xV_B \alpha C_B t_B, \quad (3)$$

где: V_B – теоретическое количество воздуха, расходуемого на горение топлива, взятое в весовых или объемных единицах.

Теплоемкость воздуха C_B – соответственно весовая или объемная.

4. Тепло, вносимое в зону подогрева сырцом:

$$Q_4 = G_C C_C t_C, \quad (4)$$

где: G_C – вес часового количества сырца; C_C – теплоемкость сырца; t_C – температура сырца в начале зоны подогрева.

Для туннельных печей следует учитывать долю тепла, вносимую в зону подогрева вагонетками:

$$Q_4' = [(G_{ш} C_{ш} + G_{уз} C_{уз} + G_k C_k) + G_M C_M] t_{ваг}, \quad (5)$$

где: $G_{ш}, G_{уз}, G_k$ – веса отдельных слоев футеровки вагонеток; $C_{ш}, C_{уз}, C_k$ – теплоемкости отдельных слоев футеровки; G_M – вес металлических частей вагонеток; C_M – теплоемкость металлических частей вагонетки; $t_{ваг}$ – температура вагонетки при поступлении в зону подогрева.

5. Тепло, вносимое избыточным воздухом, подсасываемым вне зоны горения топлива:

$$Q_5 = V_B (\alpha_2 - \alpha) x t_B C_B, \quad (6)$$

где: V_B – теоретическое количество воздуха; α_2 – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах.

Таким образом, приходная часть теплового баланса зон подогрева и обжига будет:

$$\sum_1^5 Q = Q_p^h x + x C_T t_T + x V_B \alpha C_B t_B + G_C C_C t_C + \\ + [(G_{ш} C_{ш} + G_{уз} C_{уз} + G_k C_k) + G_M C_M] t_{ваг} + V_B (\alpha_2 - \alpha) x t_B C_B, \quad (7)$$

Тепловой баланс зон подогрева и обжига представлен следующими составляющими:

1. Расходная часть тепла на испарение остаточной влаги в сырце и нагрев образующихся при этом водяных паров до температуры отходящих из печи газов.

$$Q' = G_{БЛ} (595 + 0,47 t_{ОГ}), \quad (8)$$

где: $G_{БЛ}$ – часовое количество остаточной влаги; $t_{ОГ}$ – температура отходящих газов.

2. Расход тепла на реакции, протекающие в глине в период обжига.

$$Q_2 = 5,5G_{CC}n, \quad (9)$$

где: G_{CC} – удельная составляющая сухого сырца; n – процентное содержание Al_2O_3 в сухой массе глины; 5,5 – количество тепла, затрачиваемого на реакции при обжиге.

3. Расход тепла на нагрев изделий до максимальной температуры обжига:

$$Q_3 = G_{изд} C_{изд}(t_{об} - t_c), \quad (10)$$

где: $G_{изд}$ – вес часового количества обжигаемых изделий; $C_{изд}$ – средняя теплоемкость изделий в пределах температур t_c и $t_{об}$; t_c – температура сырца в начале зоны подогрева; $t_{об}$ – максимальная температура обжига.

4. Потери тепла в окружающую среду через ограждение поверхности Q_4 .

5. Потери тепла с отходящими газами:

$$Q_5 = x(\alpha_{Г} - \alpha)V_{Г}C_{Г}t_{ОГ}, \quad (11)$$

где: $V_{Г}$ – количество продуктов горения; $C_{Г}$ – теплоемкость отходящих газов; $\alpha_{Г}$ – коэффициент избытка воздуха в отходящих газах; α – коэффициент избытка воздуха в зоне горения; $t_{ОГ}$ – температура отходящих газов.

6. Потери от неполноты горения топлива. При сжигании топлива может иметь место химическая и механическая неполнота горения. Ввиду того, что в туннельных печах химическая неполнота горения весьма мала, этой потерей можно пренебречь. Если известно процентное содержание горючего в очажных остатках и зольность топлива, то потери тепла от механического недогорания топлива подсчитываются по формуле:

$$Q_6 = 79 \frac{x A a}{100 - a}, \quad (12)$$

Таким образом, расходная часть теплового баланса зон подогрева, обжига и охлаждения печи равна:

$$\sum_1^6 Q' = G_{БЛ}(595 + 0,47t_{ОГ}) + 5,5G_{CC}n + G_{изд} C_{изд}(t_{об} - t_c) + Q_4 + x(\alpha_{Г} - \alpha)V_{Г}C_{Г}t_{ОГ} + 79x \frac{Aa}{100 - a}, \quad (13)$$

Отсюда определяется часовой расход топлива x , так как все остальные величины известны. Для того чтобы от часового расхода топлива перейти к расходу топлива на 1 тонну готовых изделий, необходимо разделить часовой расход на часовую производительность туннельной печи по готовой продукции. Укрупненная блок-схема алгоритма решения задачи представлена на рис.5.

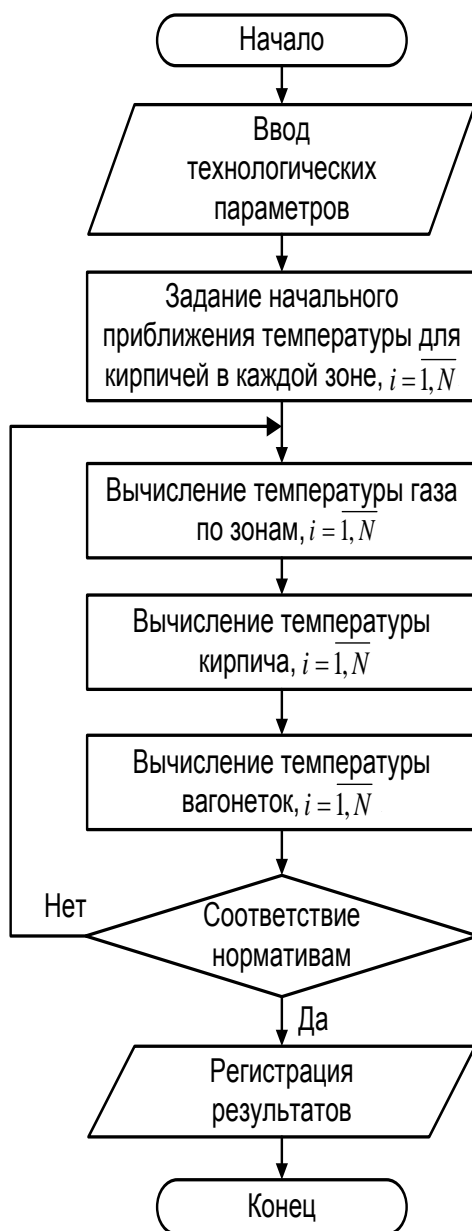


Рис.5. Блок-схема алгоритма

Третья глава посвящена вопросам моделирования технологических процессов обжига керамического кирпича.

Структура исследуемой системы представлена на рис.6. На рисунке обозначено: \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} – входы (внешние воздействия) и \bar{H} – выходные параметры.

X – параметры контроля и регулирования. Сюда относятся размещение и мощность горелок, количество и масса (объем) кирпича, открытие дымососа, темпы подачи, расход и температура воздуха, отбираемого и нагнетаемого в зону охлаждения, открытие заслонок на дымососе (управляемые параметры).

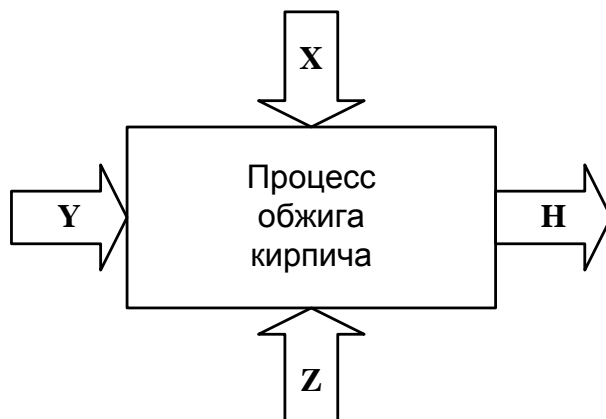


Рис.6. Структура процесса обжига

Y – контролируемые внешние воздействия: начальная температура, влагосодержание, химический состав кирпича – сырца поступающего на обжиг, газовый состав дымовых газов.

Z – независимые внешние воздействия (возмущения): характеристики тепловой установки, места отбора и нагнетания воздуха, параметры печи (геометрия и конструкция), состояние печного ограждения, гидродинамические процессы и др.

Для решения задач управления необходимо выделить параметры, доступные контролю и регулированию. Сложность объекта, неопределенность большинства параметров и их взаимосвязей, указывают на целесообразность использования методов имитационного моделирования.

Имитационная модель в данном случае может содержать элементы непрерывного и дискретного действия, и представляется эффективным аппаратом анализа и синтеза сложных систем, в которых объект управления подвержен влиянию многочисленных случайных факторов сложной природы. Возможно проведение исследований в условиях неопределенности, при нестационарных, неполных и неточных данных.

В данном случае объект моделирования может быть отнесен к классу динамических и, как правило, стохастических моделей требующих использования математических и логических средств для абстрактного отражения функционирования реальной системы во времени.

Применение имитационных моделей создает множество преимуществ в дополнение с выполнением экспериментов над составляющими элементами реальной системы и добавлением других адекватных методов. Преимущества метода – удовлетворительная точность, универсальность, наглядность моделирования, воспроизводимость результатов.

В данном случае к имитационному моделированию необходимо также прибегнуть из-за дороговизны и/или невозможности экспериментирования на реальном объекте, сложности построения аналитических моделей в связи с неопределенностью причинных связей, наличием стохастических (случайных) переменных и т. п.

В диссертации рассмотрены возможности наиболее популярных систем имитационного моделирования AnyLogic, Arena, Business Studio, NS-2, GPSS, Powersim, PTV, РДО, Simplex3, Simul8, SimuLab, Tecnomatix Plant Simulation, Transyt, Triad.Net, Vision Vissim.

Показано, что при создании моделирующего алгоритма, отражающего процессы в исследуемой системе, необходимо предусмотреть не только графическое отображение результатов математических расчетов, но и формирование с помощью ЭВМ изображений объемных объектов, то есть, фактически, графическое моделирование исследуемых процессов на информационно-математической основе.

Имитационное моделирование процесса обжига кирпича в туннельной печи проведено в диссертации с использованием системы имитационного моделирования РДО (Ресурсы – Действия – Операции), которая позволяет достаточно глубоко и точно учитывать конкретные особенности динамики объекта автоматизации. В среде РДО удобно проводить не только имитационное моделирование технологического процесса, но и анимацию для наблюдения его хода в реальном времени, что немаловажно при решении задач оптимизации управления.

Сложная динамическая система на концептуальном уровне представляется в виде множества взаимодействующих между собой ресурсов.

Ресурс определяет начальное состояние глобальной базы данных модели, это элемент сложной дискретной системы (СДС), внутренней структурой которой можно пренебречь, в то время как наличие и свойства ее как целого важны для целей описания. В зависимости от поставленной задачи ресурсом может быть любая часть системы.

Релевантный ресурс – ресурс, состояние которого изменяется.

Все ресурсы СДС образуют некоторое множество: $R = \{r_i / i = 1, \dots, N(t)\}$,

где: r_i – i -ый ресурс СДС, $N(t)$ – число ресурсов СДС в данный момент времени. Основным составляющим СДС, каковыми являются ее элементы, производственный процесс, законы функционирования, соответствуют следующие информационные объекты: ресурсы, действия, нерегулярные события и операции. Состав ИМ сложной системы приведен на рис.7.

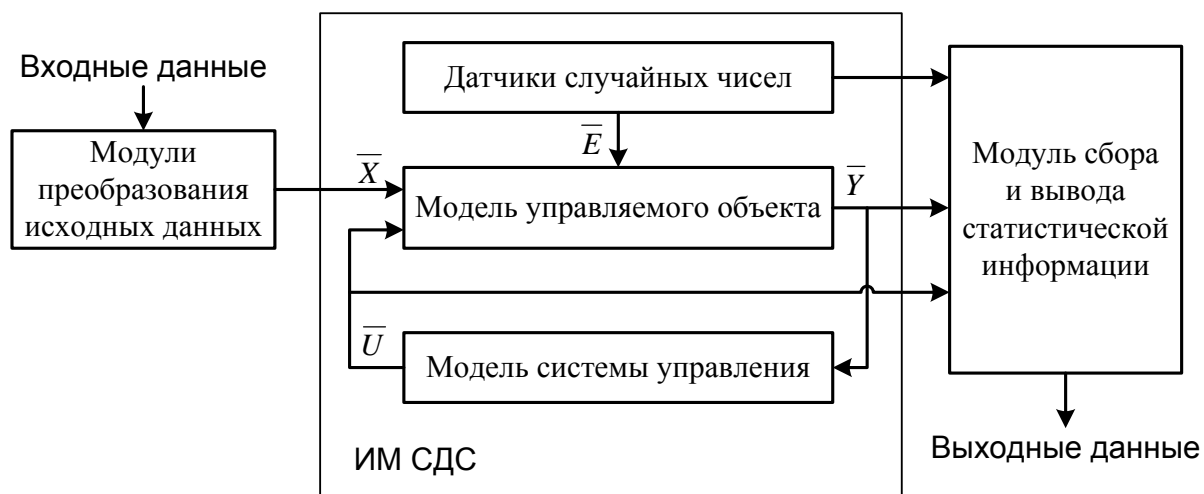


Рис.7. Состав ИМ сложной системы:

X – Контролируемые неуправляемые объекты, U – Контролируемые управляемые объекты, E – Объекты возмущения

В РДО есть возможность описать продукционное правило, оно так же, как событие не имеет длительности и мгновенно изменяет состояние системы, но запускается как действие через условие.

СДС можно довольно легко описывать с помощью продукционных правил. Все три перечисленные конструкции могут взаимодействовать и обмениваться информацией через общие ресурсы модели, которые описывают объекты моделируемой системы.

На рис.8 представлен набор параметров всех ресурсов, совокупное состояние которых определяет состояние модели. К достоинствам метода РДО стоит отнести гибкость описания процессов функционирования СДС и системы управления.

В среде РДО можно моделировать информационные потоки с различными законами распределения (равномерным, нормальным, экспоненциальным и т. п.). При этом обосновывается выбор зависимых и независимых переменных, определяется тип модели (стохастическая, детерминированная и др.). Исходные данные определяются на основе эмпирических данных, идентификации и спецификации относящихся к делу переменных.

Что касается рассматриваемого технологического процесса обжига кирпича, то для формирования исходных данных необходимо в первую очередь учитывать саму по себе сложность объекта: процесс обжига кирпича в печи подвержен влиянию множества разнородных факторов. Главные из них – количество, химический состав шихта, расход, температура, калорийность топлива, расход и температура вторичного воздуха и множество других.

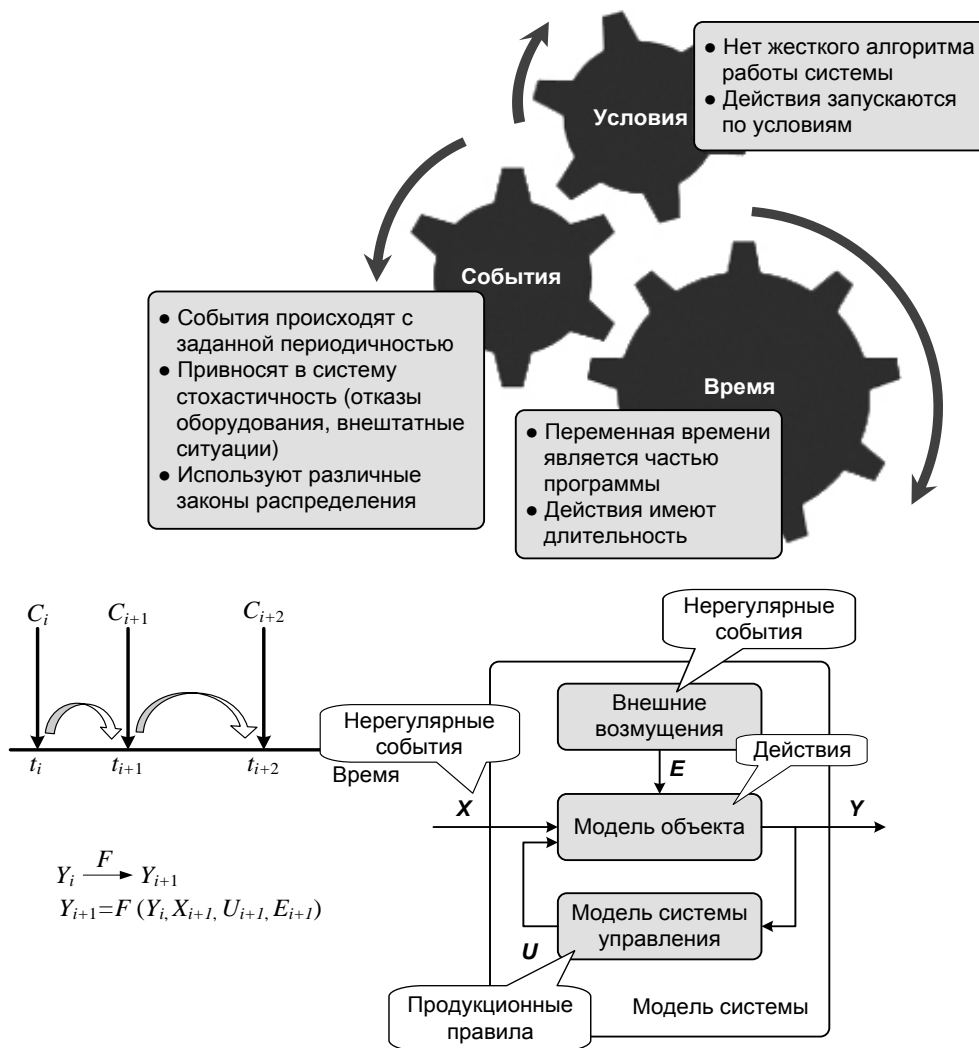


Рис.8. Набор параметров, определяющих состояние модели

Следует отметить, что специфика технологического процесса предполагает сформулировать ограничения на следующие параметры: количество операций; последовательность выполнения операций; производительность печи; удельный расход топлива; влажность кирпича-сырца, температура вторичного воздуха; скорость движения вагонетки.

Время поступления вагонетки в печь может быть определена, в частности, законом распределения, устанавливающим длительность интервалов между входными сигналами предыдущей операции.

В четвертой главе решаются задачи разработки имитационной модели и проведения имитационных экспериментов.

Имитационное моделирование в среде РДО начинается с определения ресурсов модели, в данном случае – элементов туннельной печи, которые непосредственно связаны с процессом обжига. В качестве последних выступают определенные параметры печи, технологические зоны печи, устройства контроля и управления, так что для конкретной задачи могут быть предложены различные варианты моделей. Наиболее рациональным решением представляется рассмотрение печи в целом – агрегата для производства кирпича – как единого ресурса, поскольку именно в этой модели возможно размещение и хранение практически всей информации об его функционировании.

Рациональная организация процесса обжига керамического кирпича предполагает нормализацию работы печи со снижением удельного расхода топлива и достижения требуемого качества и увеличение производительности печи.

В системе РДО знания о моделируемой системе представляются в виде модифицированных продукционных правил. Состояние любого моделируемого объекта системы определяется набором значений параметров всех элементов и соответствующей базе данных.

Таким образом, для решения поставленной задачи с использованием имитационной модели необходимо выделить и описать состояния системы и правила (алгоритмы) их изменения. Результаты регистрируются в терминах выбранного средства моделирования (в частности, алгоритмического языка) и обеспечивается их использование и дальнейшая доработка.

Схема моделирующего алгоритма имитационного моделирования исследуемой системы приведена на рис.9.

События, которые начинают или завершают действие, не планируются разработчиком модели, а инициируются по условиям, определенным по соответствующим действиям. Условия начала или окончания действий проверяются (сканируются) после очередного продвижения имитационного времени: если заданные условия удовлетворяются, то происходит соответствующее действие. Для выполнения каждого действия модели сканирование условий должно производиться для всего их множества при каждом шаге «имитационного» времени.

При моделировании в среде РДО задаются последовательные моменты времени $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N$ и состояние модели вычисляется ЭВМ

последовательно в каждый из этих моментов времени. Для этого необходимо задать правило (алгоритм) перехода модели из одного состояния в следующее, то есть преобразование: $Y_i \rightarrow Y_{i+1}, i = 1, 2, \dots, N - 1,$

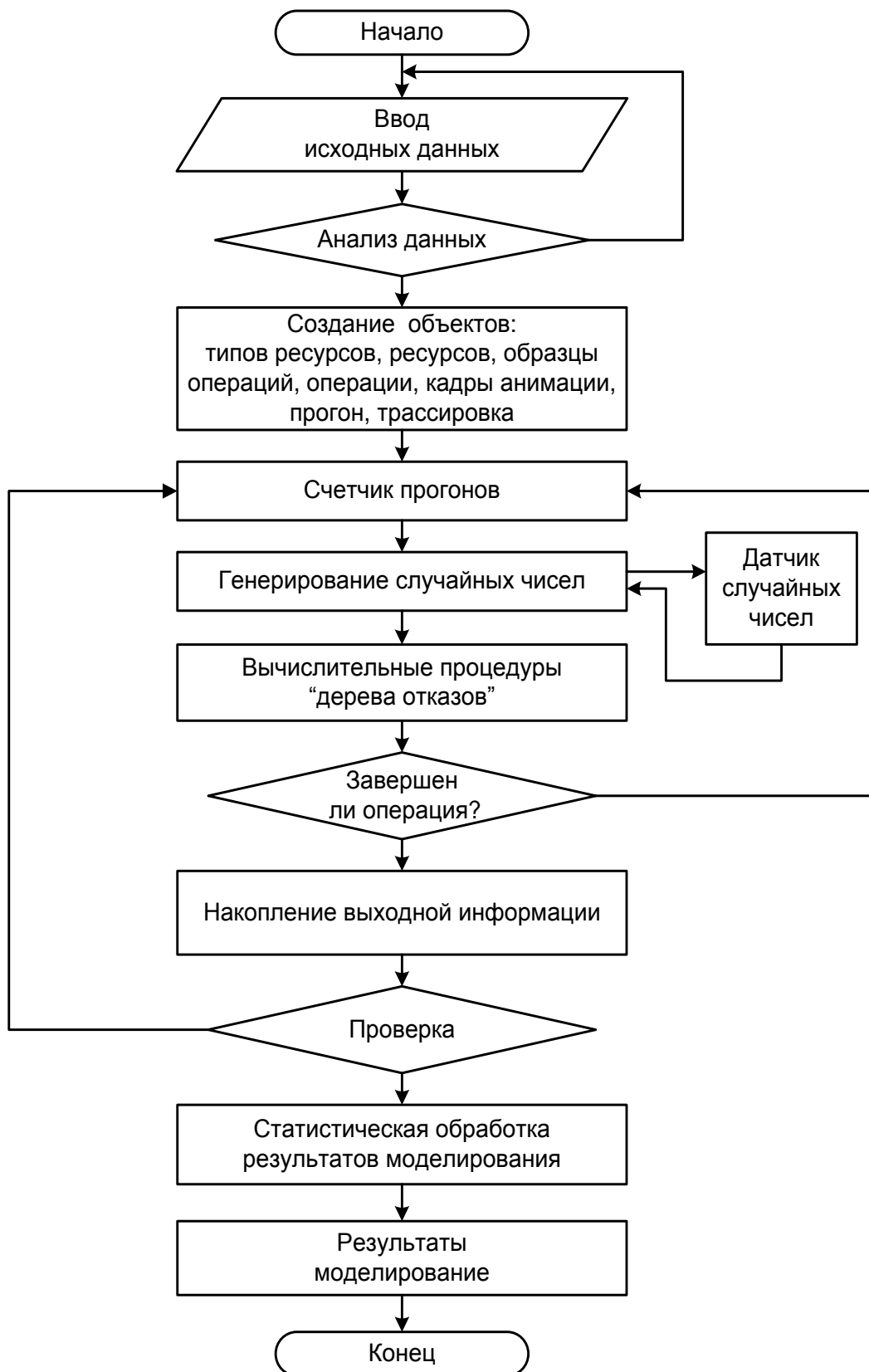


Рис.9. Схема моделирующего алгоритма

где: $Y_i = (y_1^i, y_2^i, \dots, y_n^i)$ – состояние модели в i -ый момент времени, представляющее собой вектор.

Введем в рассмотрение:

$X_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$ – вектор состояния внешней среды в i -ый момент времени,

$U_i = (u_1^i, u_2^i, \dots, u_l^i)$ – вектор управления в i -ый момент времени.

Тогда ИМ определяется заданием оператора F , с помощью которого можно определить состояние модели в следующий момент времени по состоянию в текущий момент, векторам управления и внешней среды:

$$(Y_i, X_{i+1}, U_{i+1}) \xrightarrow{F} Y_{i+1}, i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Это преобразование запишем в рекуррентной форме:

$$Y_{i+1} = F(Y_i, X_{i+1}, U_{i+1}), i = 1, 2, \dots, N - 1.$$

Оператор F определяет ИМ с ее структурой и параметрами.

Важное достоинство ИМ - возможность учета неконтролируемых факторов моделируемого объекта, представляющих собой вектор:

$$E_i = (e_1^i, e_2^i, \dots, e_q^i).$$

Тогда имеем: $Y_{i+1} = F^*(Y_i, X_{i+1}, U_{i+1}, E_{i+1}), i = 1, 2, \dots, N - 1.$

Интерфейс программной реализации представлен на рис.10.

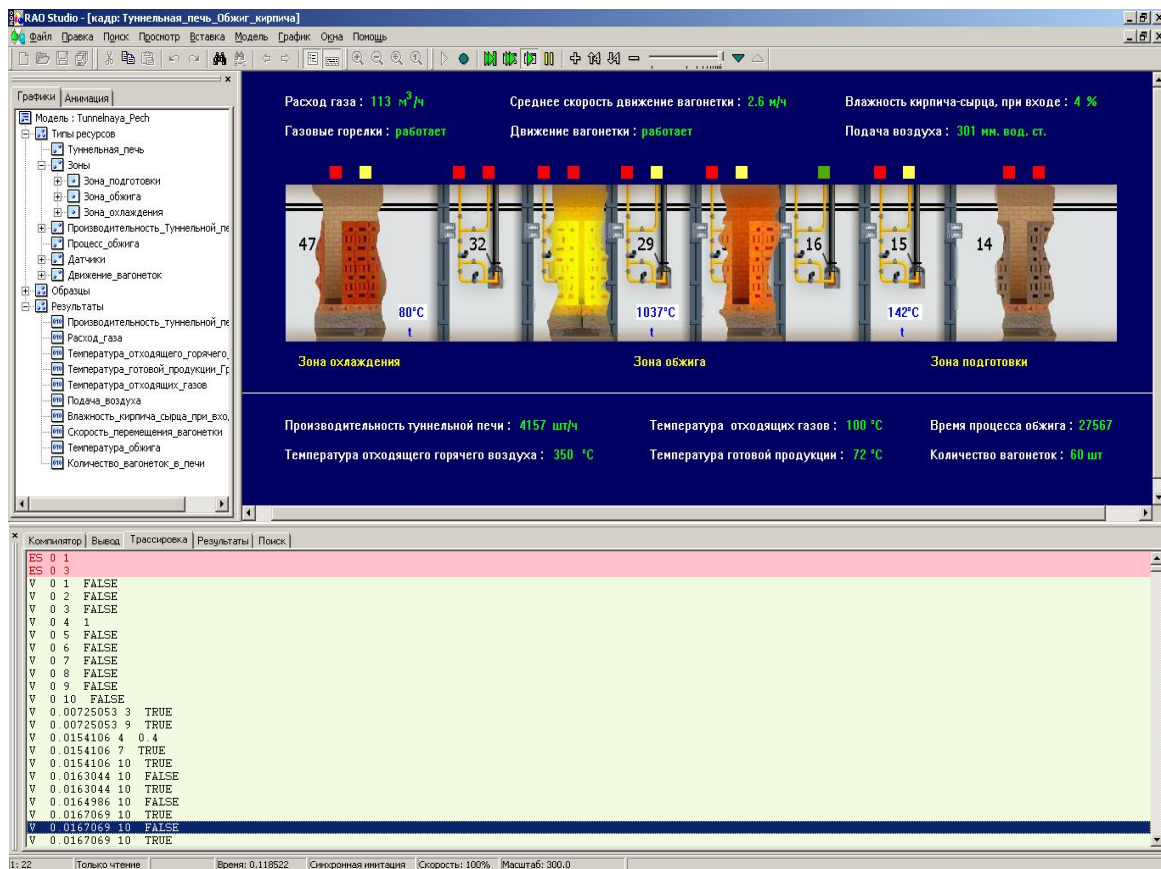


Рис.10. Окно программы в среде RDO

График процесса обжига, полученный экспериментально, и рассчитанный в среде РДО представлен на рис.11.

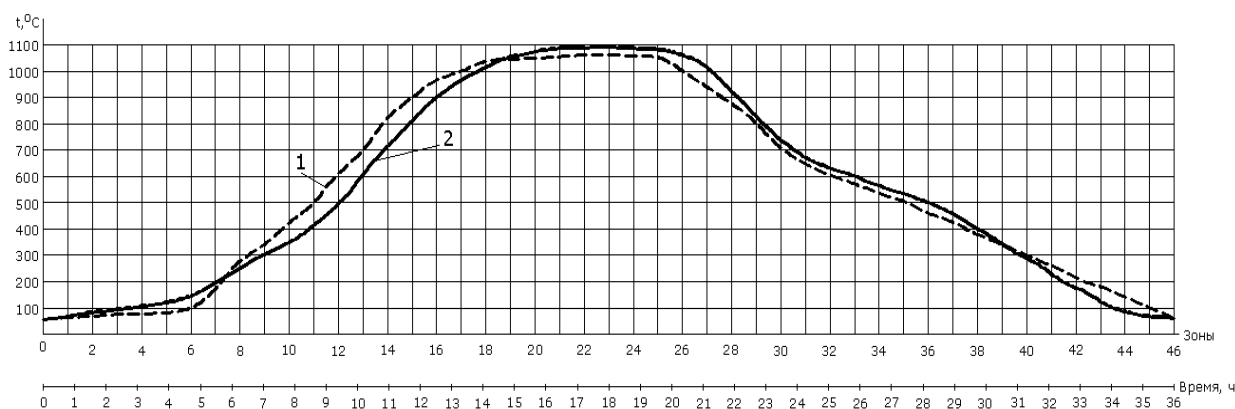


Рис.11. График процесса обжига

1 – график, полученный экспериментально, 2 – график в среде РДО.

Результаты проведенных имитационных экспериментов приведены в табл.1. Эксперименты показали, что модель системы практически полностью соответствует исследуемому объекту.

Таблица 1. Результаты проведенных имитационных экспериментов

Показатель	Рекомендуемые нормативы	Показатели в RDO
Производительность туннельной печи, шт./ч	4160	4130 - 4162
Расход газа, м ³ /ч	116	113 - 118
Температура отходящего горячего воздуха, °C	350 - 400	335 - 410
Температура готовой продукции, °C	60 - 80	62 - 77
Температура отходящих газов, °C	70 - 120	85 - 105
Подача воздуха, мм.вод.ст.	300	290 - 306
Влажность кирпича-сырца при входе, %	5 - 8	5 - 9
Средняя скорость перемещения вагонетки, м/ч	3	3 - 4
Температура обжига, °C	До 1100	1037 – 1122
Время обжига, ч	36	36
Количество вагонеток в туннельной печи, шт	60	60

В заключении представлены основные результаты работы.

Приложение содержит документы об использовании результатов работы.

Основные выводы и результаты работы

1. Проведенный анализ технологий производства керамического кирпича показал, что независимо от способа производства, главным агрегатом для обжига кирпича, является туннельная печь, поэтому рациональная организация тепловых процессов в туннельной печи является актуальной задачей.

2. В качестве математической модели описывающей комплекс процессов, происходящих в печи, подходят уравнения теплового баланса, что позволило определить основные параметры процесса обжига для дальнейшего моделирования.

3. Разработаны алгоритмы расчета температуры газовой смеси, расчета температуры материала, моделирования теплового баланса печи, учитывающие характеристики и динамику изменения основных параметров процесса обжига.

4. Сложность процесса обжига, неопределенность большинства параметров и их взаимосвязей, указывают на целесообразность использования методов имитационного моделирования.

5. В качестве среды имитационного моделирования выбрана система РДО, так как РДО позволяют более глубоко и точно учитывать особенности динамики объекта автоматизации, проводить имитационный прогон технологического процесса и анимацию для наблюдения его хода в реальном времени, что немаловажно при решении задач оптимизации управления.

6. Разработан алгоритм имитационного моделирования процесса обжига керамического кирпича в среде РДО. Проведенные имитационные эксперименты показали, что смоделированная система практически полностью соответствует объекту исследования.

7. Разработанные в соответствии с этой методикой модель, алгоритм и программы, доведены до практической реализации. Имитационная модель обеспечивает получение оптимальных параметров системы в смысле предложенного критерия и требований. При этом достигаются рациональная загрузка сырья и наилучшее время технологического процесса обжига кирпича.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ

1. Умаралиев Р.Ш. Имитационное моделирование технологических процессов термической обработки в среде RDO / М.И. Исмоилов, Ф.С. Пиров, Р.Ш. Умаралиев // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки № 3 (41), - Орел, 2011. – С. 54-60.

2. Умаралиев Р.Ш. Комплексный подход к автоматизации технологического процесса сушки керамического кирпича / М.И. Исмоилов, А.В. Остроух, Р.Р. Чаудхари, Р.Ш. Умаралиев // Промышленные АСУ и контроллеры № 4, 2012. – С. 7-9.

Публикации в других изданиях

3. Умаралиев Р.Ш. Проблемы автоматизации технологий производства строительного кирпича / М.И. Исмоилов, М.И. Кашляк, Р.Ш. Умаралиев // Принципы построения и особенности использования мехатронных систем: сб. науч. тр. № 3 (43), МАДИ (ГТУ). - М., 2009. – С. 116-121.

4. Умаралиев Р.Ш. Создание моделей системной динамики в программе AnyLogic 6.4.1 / К.Н. Мезенцев, Ф.С. Пиров, Р.Ш. Умаралиев // Интеграционные решения в промышленности, науке и образовании: сб. науч. тр. МАДИ (ГТУ). - М., 2010. – С. 52-59.

5. Умаралиев Р.Ш. Автоматизированная система управления технологическим процессом обжига кирпича / М.И. Исмоилов, Р.Ш. Умаралиев // Теория и практика электронного документооборота в промышленности: сб. науч. тр. № 2 (50), МАДИ. - М., 2011. – С. 176-183.

6. Умаралиев Р.Ш. Рациональная организация тепловых процессов производства керамического кирпича / М.И. Исмоилов, Р.Ш. Умаралиев // Теория и практика электронного документооборота в промышленности: сб. науч. тр. № 2 (50), МАДИ. - М., 2011. – С. 184-187.

7. Умаралиев Р.Ш. Автоматическое регулирование тепловых процессов производства строительного кирпича / Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции «Перспективы применения инновационных технологий и усовершенствования технического образования в высших учебных заведениях стран СНГ». – Душанбе, 2011. – С. 134-136.