

DOI 10.53364/24138614\_2021\_22\_3\_21  
УДК 624.048:666.3.047

<sup>1</sup>Золотов А.Д., <sup>2</sup>Жакенбаев С.Т.

<sup>1,2</sup>НАО Университет имени Шакарима города Семей  
г.Семей, РК.

<sup>1</sup>E-mail: [Azol64@mail.ru](mailto:Azol64@mail.ru)\*

<sup>2</sup>E-mail: [szakenbaev@gmail.com](mailto:szakenbaev@gmail.com)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА В ТУННЕЛЬНЫХ СУШИЛАХ

### ТУННЕЛЬДІ КЕПТІРГІШТЕРДЕ КЕРАМИКАЛЫҚ КІРПІШТІ КЕПТІРУ ПРОЦЕСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

### MATHEMATICAL MODELING OF THE DRYING PROCESS OF CERAMIC BRICKS IN TUNNEL DRYERS

**Аннотация.** Стадия сушки в технологическом процессе производства керамического кирпича является определяющей, так как в этот период возможно образование трещин, которые обуславливают прочность и качество готовой продукции. Стадия сушки сопровождается значительными энергозатратами, которые можно снизить за счет использования автоматизированного управления. Для того чтобы высушить сырец в наименьший срок и с наименьшим количеством брака, сушки нужно вести строго по режиму, установленному опытным путем.

В статье рассмотрена разработка математической модели процесса сушки керамического кирпича, которая обеспечивает его точную регулировку, для того чтобы повысить качество керамического кирпича и уменьшить энергоемкость. Проведено исследование математической модели процесса сушки с использованием современных информационных технологий, а именно программы MATLAB 8.5 и пакета моделирования динамических систем Simulink.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, сушка, керамический кирпич, температура, регулировка.

**Аңдатпа.** Керамикалық кірпіш өндірісінің технологиялық процесінде кептіру кезеңі шешуші болып табылады, өйткені осы кезеңде дайын өнімнің беріктігі мен сапасын анықтайтын жарықтар пайда болуы мүмкін. Кептіру кезеңі автоматтандырылған басқаруды қолдану арқылы азайтуға болатын айтарлықтай энергия шығындарымен бірге жүреді. Ірімшікті ең аз мерзімде және ең аз мөлшерде кептіру үшін кептіруді эмпирикалық жолмен белгіленген режимге сәйкес қатаң жүргізу керек.

Мақалада керамикалық кірпіштің сапасын жақсарту және энергия шығынын азайту үшін оның дәл реттелуін қамтамасыз ететін керамикалық кірпішті кептіру процесінің математикалық моделін жасау қарастырылған. Заманауи ақпараттық технологияларды, атап айтқанда MATLAB 8.5 бағдарламасын және Simulink динамикалық жүйелерді модельдеу пакетін қолдана отырып, кептіру процесінің математикалық моделін зерттеу жүргізілді.

**Түйін сөздер:** математикалық модельдеу, кептіру, керамикалық кірпіш, температура, реттеу.

**Abstract.** The drying stage in the technological process of ceramic brick production is crucial, since during this period it is possible to form cracks that determine the strength and quality of the finished product. The drying stage is accompanied by significant energy consumption, which can be reduced through the use of automated control. In order to dry the raw material in the shortest possible time and with the least amount of waste, drying must be carried out strictly according to the regime established experimentally.

The article examines the development of a mathematical model of the drying process of ceramic bricks, which ensures its precise adjustment in order to improve the quality of ceramic bricks and reduce energy consumption. A study of a mathematical model of the drying process using modern information technologies, namely the MATLAB 8.5 program and the Simulink dynamic system modeling package, has been carried out.

**Keywords:** mathematical modeling, drying, ceramic brick, temperature, adjustment.

Одна из программ, принятой правительством Республики Казахстан является Государственной программой жилищно-коммунального развития "Нұрлы жер" на 2020 - 2025 годы. Основной целью программы является увеличение ежегодного объема ввода жилья за счет всех источников финансирования до 20,7 млн. кв. метров к 2025 году [1]. Это привело к росту спроса и объема производства строительных материалов. Одним из основных строительных материалов для возведения жилых домов, зданий, сооружений является керамический кирпич, поэтому для достижения цели программы необходимо увеличить производство и качество кирпичей.

Наиболее энергоемким и трудоемким процессом при производстве кирпича является обжиг, так как при этом формируются свойства кирпича, регламентирующие качество получаемого продукта.

Обжиг кирпича проводят преимущественно (до 60%) в туннельных печах и характеризуется распределением температуры газовой среды, нестабильностью свойств полуфабриката, а также невозможностью контроля свойств керамического материала в период его длительного (до 100 часов) пребывания в печи.

Одним из основных процессов характеризующих не только качество кирпича, но и уменьшение энергозатрат является разработка системы управления процессом на основе математической модели туннельной печи.

Каждый блок печи имеет свою тепловую систему, которая состоит из: парового калорифера, вентиляторов, которые подают горячий теплоноситель, выбрасывают отработанный теплоноситель, а также системы рециркуляции. Туннельные сушилки на кирпичных заводах работают по принципу противотока. Сырец на вагонетках движется по тоннелю навстречу потоку горячего воздуха или дымовых газов. Продолжительность сушки кирпича-сырца в туннельных сушилах составляет 16-100 часов при начальной температуре теплоносителя 30 – 35 °С.

Основным уравнением, связывающим динамические и статические процессы является уравнение теплового баланса, которое имеет вид [2,3]:

$$Q_M = Q_M + Q_{Tr} + Q_{Og} + Q_{нс} , \quad (1)$$

где:  $Q_M$ -расход энергии теплоносителя, Дж;

$Q_M$  – расход энергии на подогрев материала, Дж;

$Q_{Tr}$  - расход энергии на подогрев транспорта, Дж;

$Q_{Og}$  - затраты энергии на ограждение, Дж;

$Q_{нс}$  - затраты энергии в окружающую среду, Дж.

$$Q_M = M_a * C_a * t_{вх} , \quad (2)$$

где  $t_{вх}$  – температура сушильного агента, °С ;

$M_a$ -расход атмосферного воздуха, кг / ч;

$C_a$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж / кг  $^{\circ}\text{C}$  .

$$Q_M = M_{вл} \cdot r + m_{см} \cdot (C_{см} + C_{вл} \cdot C_{вл}) \frac{dt_n}{dt} = \alpha \cdot F \cdot (t_{сп} - t_n) \quad (3)$$

где:  $M_{вл}$  – масса влаги, которая испаряется за единицу времени; кг/с;

$r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$m_{см}$ -масса сухого материала, кг;

$C_{см}$ -удельная теплоемкость сухого материала, Дж/кг  $^{\circ}\text{C}$

$C_{вл}$ -среднее влагосодержание изделия, кг / кг;

$t$ – время сушки, час.;

$F$  - площадь поверхности забора, м  $^2$  ;

$t_n$  – температура поверхности материала,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$ - средний коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала, Вт / м  $^2$   $^{\circ}\text{C}$  ;

$t_{сп}$  - средняя температура сушильного агента,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{тр} = m_{тр} \cdot c_{тр} \cdot \frac{dt_{тр}}{dt} \quad (4)$$

где:  $m_{тр}$  - масса транспорта, кг;

$c_{тр}$  - удельная теплоемкость транспорта, Дж / кг  $^{\circ}\text{C}$  ;

$t_{тр}$  – температура транспорта,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{ог} = \frac{dt_{ог}}{dt} \cdot \sum_{j=1}^n m_j \cdot C_j \quad (5)$$

где:  $m_j$  – масса j-го слоя ограждения, кг;

$C_j$  -удельная теплоемкость соответствующего слоя ограждения, Дж / кг  $^{\circ}\text{C}$  ;

$t_{ог}$  – средняя температура ограждения,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q_{нс} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot k_i \cdot (0.5 \cdot (t_{вх} + t_{вых}) - t_i) \quad (6)$$

где:  $F_i$ -площадь пола и стен, м  $^2$ ;

$k_i$  – коэффициент теплоотдачи, Вт / м  $^2$   $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{вх}$  – температура сушильного агента,  $^{\circ}\text{C}$ ;

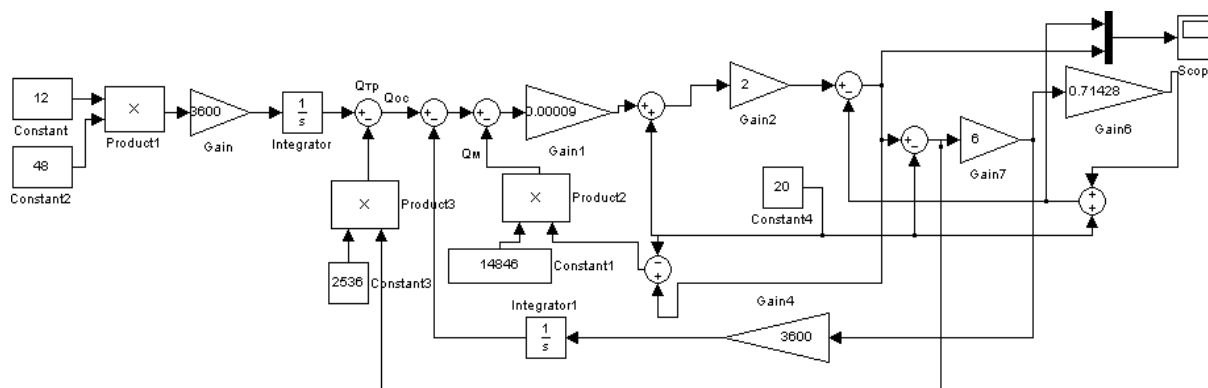
$t_{вид}$ -температура отработанного теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_i$  – температура i-го слоя ограждения,  $^{\circ}\text{C}$ .

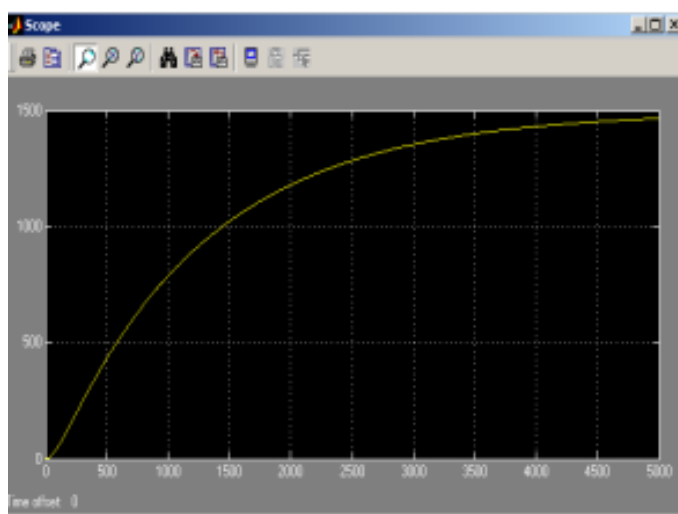
Программа MATLAB 8.5 и пакет моделирования динамических систем Simulink дает возможность разработать и реализовать блок-схемы модели сушки керамического кирпича в туннельных сушилах, а также определить влияние параметров сушила на температурный режим и основные характеристики кирпича.

Блок-схема модели для туннельной сушилки представлена на рис. 1.

Приведенные уравнения (1) - (6) описывают взаимосвязь тепловых процессов и туннельного сушила. Реализация вычислений выполнена в программной среде MATLAB Simulink, что позволяет в наглядной форме решать уравнения, описывающие динамику процесса.



**Рисунок 1.** Блок-схема модели сушки керамического кирпича в туннельной сушилке, реализованная в среде Simulink согласно уравнениям (1) – (6)



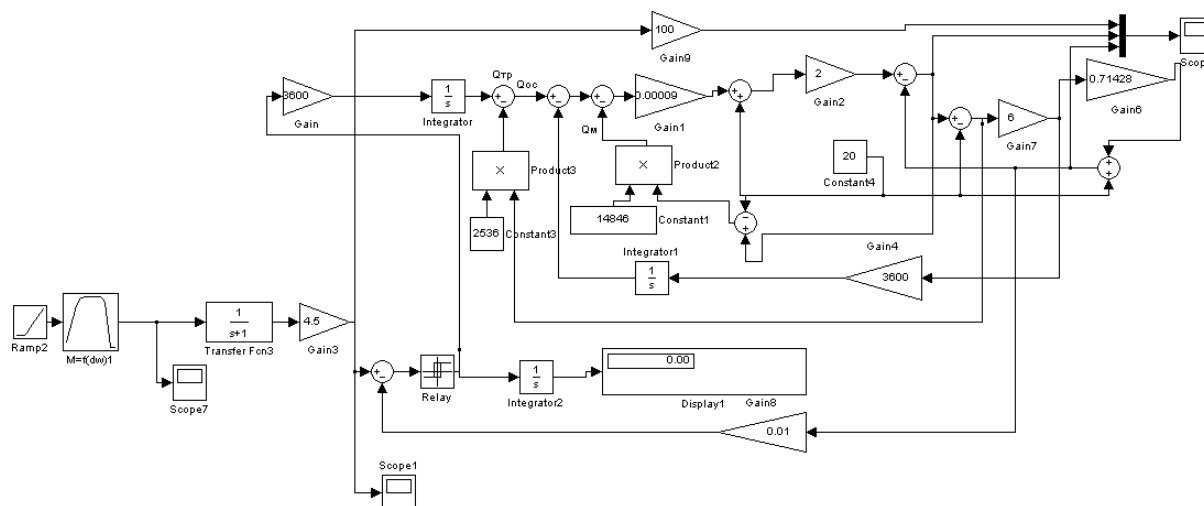
**Рисунок 2** – Динамические характеристики разработанной модели

Входными величинами блок-схемы модели туннельной сушилки являются:

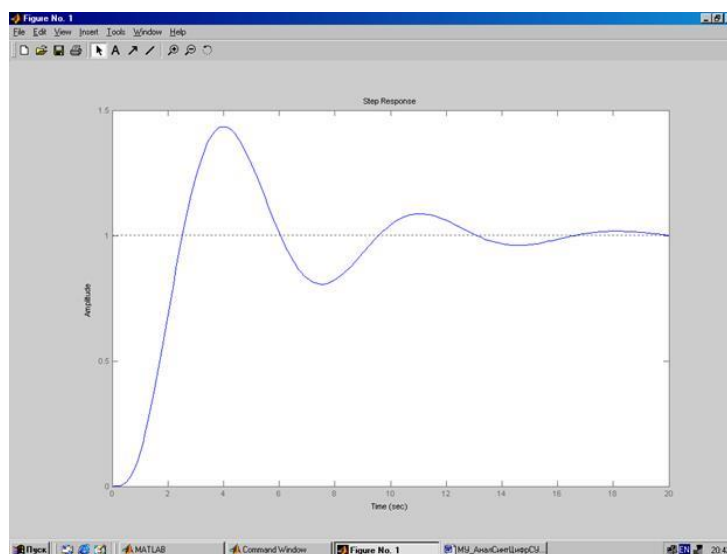
- Ma-расход атмосферного воздуха, 20000 кг / ч;
- tвх– температура сушильного агента, 80 °С ;
- t0– температура окружающей среды, 20 °С ;
- τ- время сушки, 80 часов.

Выходными величинами блок-схемы модели туннельной сушилки являются: температура в туннельной сушилке.

Для оптимального регулирования температуры, обеспечивающую заданные параметры качества, вводим в блок-схему модели туннельной сушилки ПИД регулятор (рис.3). Данный регулятор состоит из блоков пакета моделирования динамических систем. Реализация процесса регулирования выполнена в программной среде MATLAB Simulink, что позволяет наглядно наблюдать закон изменения температуры внутри и на поверхности туннельной сушилки.



**Рисунок 3** – Блок-схема системы регулирования температуры туннельной печи обжига кирпича.



**Рисунок 3** - График изменения температуры во времени

Данную модель можно использовать для уточнения задания начальных и граничных условий математической модели сушки керамического кирпича, что позволит определить более четкую картину сушки изделий в туннельных сушилках. Переходный процесс моделируемой системы имеет вид.

### Литература

1. Государственная программа жилищно-коммунального развития "Нұрлы жер" на 2020 - 2025 годы.
2. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов: учеб. для техникумов пром-сти строит. материалов/ под ред. В. С. Кочетова. – Изд. 2-е, перераб и доп. – Ленинград: Стройиздат, 1981. – 456 с.
3. Глухов В. Н. Автоматическое регулирование процессов термообработки и сушки строительных изделий. – Л., Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 88 с.
4. López, C. P. MATLAB Control Systems Engineering / César Pérez López. – Apress, 2014. – 163 p.

5. Optimization Toolbox. [Электронный ресурс] URL: [https://matlab.ru/products/optimization-toolbox/optimization-toolbox-rus\\_web.pdf](https://matlab.ru/products/optimization-toolbox/optimization-toolbox-rus_web.pdf).

### References

1. Gosudarstvennaia programma jilişno-kommunälного razvitiä "Nürly jer" na 2020 - 2025 gody.
2. Avtomatizatsia proizvodstvennyh prosessov i ASUP promyšlenosti stroitelnyh materialov: ucheb. dlä tehnikumov prom-sti stroit. materialov/ pod red. V. S. Kochetova. – İzd. 2-e, pererab i dop. – Leningrad : Stroiizdat, 1981. – 456 s.
3. Gluhov V. N. Avtomaticheskoe regulirovanie prosessov termoobrabotki i suški stroitelnyh izdeli. – L., Stroiizdat. Leningr. otd-nie, 1982. – 88 s.
4. López, C. P. MATLAB Control Systems Engineering / César Pérez López. – Apress, 2014. – 163 p.
5. Optimization Toolbox. [Elektronnyi resurs] URL: [https://matlab.ru/products/optimization-toolbox/optimization-toolbox-rus\\_web.pdf](https://matlab.ru/products/optimization-toolbox/optimization-toolbox-rus_web.pdf).