

УДК 62-52

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЗОНЫ ОХЛАЖДЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПОДАЧЕЙ ОХЛАЖДАЮЩЕГО АГЕНТА**М.А. Назаров, А.А. Заварзин¹**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, andrew163ru@mail.ru

Аннотация. Выполнен анализ технологического процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления с распределенными по продольной координате параметрами. Выявлено, что рассматриваемый процесс оказывает существенное влияние на прочность готового кирпича, при этом исследования в области разработки эффективных методов и средств управления этим этапом практически отсутствуют. В ходе работы были определены: вектор выходных координат, включающий температуры кирпича и охлаждающего воздуха и их градиенты по продольной координате печи; вектор управляющих воздействий, состоящий из расходов подаваемого охлаждающего воздуха и отбираемого воздуха; вектор возмущающих воздействий – температуры кирпича на входе в зону охлаждения, воздуха, подаваемого в зону охлаждения, и окружающей среды. Разработана расчетная схема процесса снижения температуры керамического кирпича с учетом произвольного количества точек подачи и отбора воздуха в зону охлаждения, что определяет количество и размеры ее участков. С учетом принятых допущений и упрощений выполнено математическое описание статического режима работы зоны охлаждения с распределенными подачей и отбором охлаждающего агента в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями, которое проблемно ориентировано на синтез систем автоматического управления. Решение этой системы позволило определить математические операторы, связывающие выходные координаты с управляющими и основными возмущающими воздействиями. В дальнейшем результаты работы могут быть использованы для создания эффективных систем управления процессом охлаждения кирпича, которые позволят повысить качество продукции и снизить энергетические затраты на производство.

Ключевые слова: керамический кирпич, туннельная печь, зона охлаждения, математическая модель, объект управления с распределенными параметрами.

Введение

Керамический кирпич благодаря своим свойствам является одним из самых распространенных конструкционных строительных материалов. Его показатели



© Автор(ы), 2025

¹ Максим Александрович Назаров, кандидат технических наук, доцент кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства.

Андрей Александрович Заварзин, инженер кафедры механизации, автоматизации и энергоснабжения строительства.

качества в значительной степени закладываются на последнем из основных этапов технологического процесса, а именно при обжиге, который чаще всего осуществляется в туннельной печи. При этом туннельная печь делится на три зоны: предварительного нагрева, собственно обжига и охлаждения [1–3].

В зоне охлаждения крайне важно придерживаться установленного технологическим регламентом температурного режима, так как его нарушение может вызвать образование трещин, а вследствие появления остаточного напряжения в теле кирпича происходит уменьшение прочности конечного продукта [4–7]. Тепловой режим обычно задается в виде температурной кривой, показывающей желаемый характер изменения температуры кирпича по продольной координате печи [1]. Очевидно, что основной задачей управления рассматриваемым процессом является получение кривой охлаждения, которая будет находиться в пределах допустимого диапазона отклонений температур. Вид этой характеристики зависит от множества технологических факторов. Создание математической модели, связывающей управляющие и возмущающие воздействия процесса охлаждения кирпича с температурами, определяющими кривую охлаждения, является важным вопросом [8–10]. Ее решение позволит не только адекватно подобрать оборудование для обеспечения требуемых режимов работы, но и при решении обратной задачи по заданной температурной кривой сформировать вектор управляющих воздействий в каналах системы автоматизации туннельной печи. Однако в настоящее время исследования по данной тематике практически отсутствуют. Поэтому математическое описание процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления является актуальной задачей, чему и посвящена настоящая статья.

Постановка задачи

Проведем анализ технологического процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи как объекта управления. Туннельная печь представляет собой длинный канал 1, по которому движутся вагонетки 2 с кирпичом 3 (рис. 1). Изделия на вагонетке проходят от одного до другого конца канала, последовательно подвергаясь предварительному подогреву, обжигу и охлаждению в соответствующих зонах. В зону охлаждения кирпич попадает после зоны обжига, при этом охлаждающий агент (воздух) движется ему навстречу со стороны выхода изделий из печи, то есть рассматриваемая зона работает по принципу противотока. В дальнейшем будем считать, что в общем случае охлаждающий воздух подается в n точках, распределенных по длине зоны охлаждения, что делит ее на n участков. При этом в конце каждого участка присутствует также отбор воздуха, нагретого в процессе охлаждения кирпича. Такая распределенная подача и отбор охлаждающего агента открывают дополнительные возможности с точки зрения повышения гибкости и показателей качества управления процессом.

На основании анализа технологии выделим объект управления, под которым будем понимать процесс охлаждения керамического кирпича в туннельной печи с распределенными по длине подачей и отбором охлаждающего агента.

Температурная кривая на этапе охлаждения определяется температурами $\partial T_{ki}(x_i, t)$ кирпича и характеризуется градиентами $\frac{\partial T_{ki}(x_i, t)}{\partial x_i}$ в произвольном сечении i -го участка зоны охлаждения ($i \in 0, 1 \dots n$). Однако техническая возможность отслеживания данных параметров в печи отсутствует, поэтому контроль

осуществляется косвенным методом, а именно по температурам $\partial T_{ei}(x_i, t)$ воздуха, а также градиентам $\frac{\partial T_{ei}(x_i, t)}{\partial x_i}$. Тогда можем считать, что рассматриваемый этап в необходимой для контроля соблюдения технологических требований степени характеризуется вектором выходных координат

$$Y(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n, t) = [Y_1(x_1, t) \quad Y_2(x_2, t) \quad \dots \quad Y_{n-1}(x_{n-1}, t) \quad Y_n(x_n, t)]^T,$$

где

$$Y_i(x_i, t) = \left[T_{ki}(x_i, t) \quad T_{ei}(x_i, t) \quad \frac{\partial T_{ki}(x_i, t)}{\partial x_i} \quad \frac{\partial T_{ei}(x_i, t)}{\partial x_i} \right]^T;$$

T – знак транспонирования.

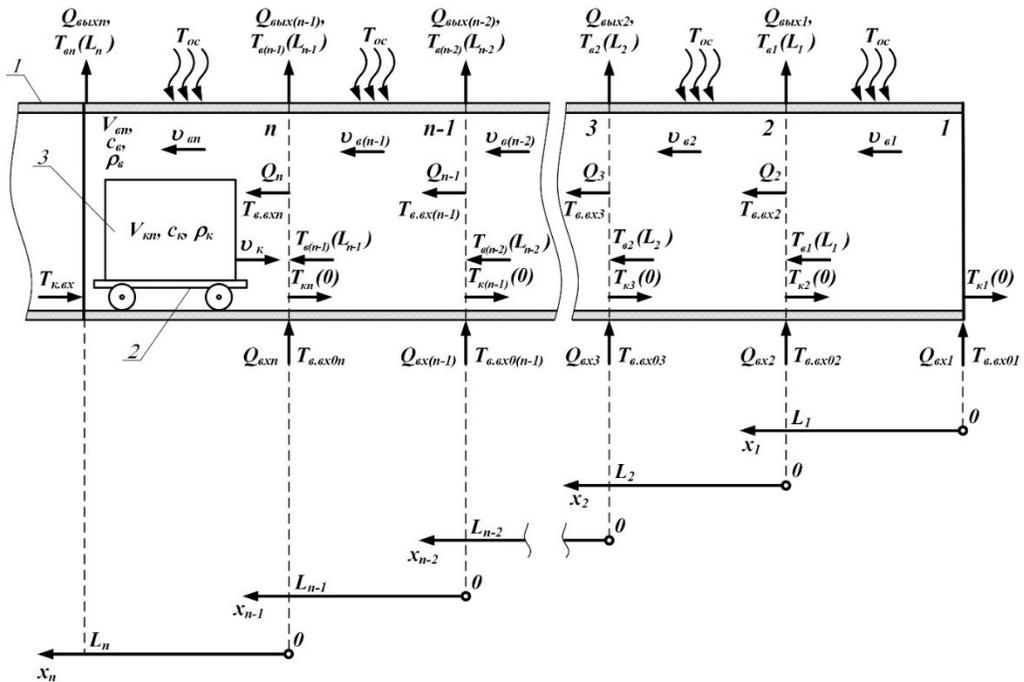


Рис. 1. Расчетная схема зоны охлаждения с распределенными подачей и отборами воздуха как объекта управления

Считаем, что зона охлаждения оборудована n исполнительными устройствами, позволяющими регулировать расходы $Q_{вхi}(t)$ подаваемого охлаждающего воздуха, и n исполнительными устройствами, определяющими расходы $Q_{выхi}(t)$ отбираемого воздуха. Эти параметры формируют вектор управляющих воздействий

$$U(t) = [Q_{вх1}(t) \quad Q_{вх2}(t) \quad \dots \quad Q_{вх(n-1)}(t) \quad Q_{вхn}(t) \quad Q_{вых1}(t) \quad Q_{вых2}(t) \quad \dots \quad Q_{вых(n-1)}(t) \quad Q_{выхn}(t)]^T.$$

Стоит отметить, что в качестве исполнительных устройств могут использоваться дутьевые вентиляторы или регулируемые клапаны.

Очевидно, что условия реального производства подразумевают наличие внешних факторов, которые нежелательным образом воздействуют на объект управления и приводят к отклонению выходных координат от требуемых значе-

ний. Известно, что при осуществлении обжига керамических стеновых материалов наблюдается вариация температуры $T_{к.вх}(t)$ кирпича на входе в зону охлаждения, температуры $T_{в.вх0i}(t)$ воздуха, подаваемого в зону охлаждения, и температуры $T_{oc}(t)$ окружающей среды, что существенно влияет на протекание технологического процесса, чем нельзя пренебречь. Поэтому перечисленные факторы составляют вектор возмущающих воздействий

$$\mathbf{H}(t) = [T_{к.вх}(t) \ T_{в.вх0i}(t) \ T_{oc}(t)]^T.$$

В данной работе ограничимся рассмотрением только лишь установившегося режима работы установки (то есть при $t \rightarrow \infty$), чего достаточно для построения участка температурной кривой, соответствующего этапу охлаждения. Найдем операторы, связывающие выходные координаты с управляющими и возмущающими воздействиями.

Решение поставленной задачи

При разработке математического описания статического режима работы объекта управления необходимо учесть ряд допущений, которые позволят упростить анализ без существенного снижения точности моделирования. Рассмотрим следующие предположения:

1) считаем, что конструкция рассматриваемой печи обеспечивает сосредоточенную в пространстве подачу охлаждающего воздуха в начале каждого участка зоны охлаждения (то есть в точках $x_i = 0$) и сосредоточенный отбор в конце каждого участка (при $x_i = L_i$);

2) допускаем, что температуры кирпича и охлаждающего воздуха имеют одинаковые значения во всех точках поперечного сечения при фиксированном значении координаты x_i , т. е. достаточно наблюдать изменение параметров только вдоль осей x_i ;

3) считаем, что плотности ρ_k и ρ_v и удельные теплоемкости c_k и c_v кирпича и воздуха, находящихся в зоне охлаждения, не изменяются и остаются постоянными в течение всего времени протекания процесса;

4) принимаем, что скорость v_k движения вагонеток с кирпичом постоянна по всей длине туннельной печи;

5) пренебрегаем способностью вагонеток аккумулировать тепло.

Для упрощения понимания протекающих процессов и дальнейшей формализации описания статического режима работы рассматриваемой зоны туннельной печи исходя из анализа технологии производства керамического кирпича, конструкции и принципа работы установки изобразим расчетную схему процесса охлаждения (см. рис. 1). Из представленной схемы видно, что для удобства моделирования зона охлаждения разбита на n участков, поведение которых очевидно может быть описано собственной совокупностью математических зависимостей. При этом сформированные в n -м элементе переменные воздействуют на соседние участки, тем самым обуславливая единство математической модели зоны охлаждения в целом.

На основании расчетной схемы и с учетом принятых допущений статический режим процесса охлаждения керамического кирпича в туннельной печи с распределенной подачей и отбором охлаждающего агента опишем системой дифференциальных уравнений для каждого из обозначенных участков:

$$\left. \begin{aligned} v_k \cdot \frac{dT_{ki}(x_i)}{dx_i} - \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{ki} \cdot \rho_k \cdot c_k} \cdot (T_{ki}(x_i) - T_{ei}(x_i)) &= 0; \\ -v_{ei} \cdot \frac{dT_{ei}(x_i)}{dx_i} + \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{ei} \cdot \rho_e \cdot c_e} \cdot (T_{ki}(x_i) - T_{ei}(x_i)) - \frac{k_{ei} \cdot F_{ei}}{V_{ei} \cdot \rho_e \cdot c_e} \cdot (T_{ei}(x_i) - T_{oc}) &= 0, \end{aligned} \right\} (1)$$

где V_{ki} – объем кирпича, находящегося на i -м участке зоны охлаждения,

$$V_{ki} = V_k \cdot \frac{L_i}{n};$$

$$\sum_{i=1}^n L_i$$

V_k – общий объем кирпича, находящегося в зоне охлаждения; L_i – длина i -го участка; V_{ei} – объем воздуха, находящегося на i -м участке зоны охлаждения,

$$V_{ei} = F_n \cdot L_i - V_{ki};$$

v_{ei} – скорость охлаждающего воздуха на i -м участке,

$$v_{ei} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{F_{ce}};$$

Q_i – расход воздуха через i -й участок,

$$Q_i = Q_{вхi} + Q_{i-1} - Q_{вых(i-1)};$$

$F_{св}$ – площадь поперечного сечения пространства печного туннеля, свободного от кирпича; α_i – коэффициент теплоотдачи кирпича охлаждающему воздуху на i -м участке,

$$\alpha_i \approx k_{ei} \cdot (5.3 + 3.6 \cdot k_{Ti} \cdot v_{ei});$$

k_{ei} – коэффициент, учитывающий сложную конфигурацию воздушного канала, образованного печным каналом и садкой кирпича; k_{Ti} – поправочный коэффициент, учитывающий температуру воздуха на i -м участке; F_i – эффективная площадь поверхности теплообмена между кирпичом и потоком охлаждающего воздуха на i -м участке; k_{ei} – коэффициент теплопередачи между воздухом и окружающей средой через ограждающие конструкции туннельной печи,

$$k_{ei} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ei}} + \sum_{j=1}^r \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_n}};$$

δ_j и λ_j – толщина и коэффициент теплопроводности материала j -го слоя ограждающей конструкции зоны охлаждения ($j \in 0, 1, \dots, r$); α_{ei} – коэффициент теплоотдачи от охлаждающего воздуха к внутреннему слою ограждающей конструкции на i -м участке [1],

$$\alpha_{ei} \approx 5.3 + 3.6 \cdot k_{Ti} \cdot v_{ei};$$

α_n – коэффициент теплоотдачи от внешнего слоя ограждающей конструкции к окружающей среде; F_{ei} – площадь теплообмена между воздухом и окружающей средой через стены туннельной печи на i -м участке,

$$F_{ei} = F_e \cdot \frac{L_i}{\sum_{i=1}^n L_i};$$

F_e – полная площадь теплообмена между воздухом и окружающей средой через стены туннельной печи.

Для нахождения частного решения дополним уравнения (1) системой граничных условий:

$$\left. \begin{aligned} T_{\kappa 1}(x_1)|_{x_1=L_1} &= T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=0}; \\ T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=L_2} &= T_{\kappa 3}(x_3)|_{x_3=0}; \\ &\dots \\ T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} &= T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=0}; \\ T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=L_n} &= T_{\kappa. ex}; \\ T_{e1}(x_1)|_{x_1=0} &= T_{e. ex1}; \\ T_{e2}(x_2)|_{x_2=0} &= T_{e. ex2}; \\ &\dots \\ T_{e(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} &= T_{e. ex(n-1)}; \\ T_{en}(x_n)|_{x_n=0} &= T_{e. exn}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При этом температуры охлаждающего агента на входе в i -й участок

$$\left. \begin{aligned} T_{e. ex1} &= T_{e. ex01}; \\ T_{e. ex2} &= \gamma_{e12} \cdot T_{e1}(x_1)|_{x_1=L_1} + \gamma_{e22} \cdot T_{e. ex02}; \\ &\dots \\ T_{e. ex(n-1)} &= \gamma_{e1(n-1)} \cdot T_{e(n-2)}(x_{n-2})|_{x_{n-2}=L_{n-2}} + \gamma_{e2(n-1)} \cdot T_{e. ex0(n-1)}; \\ T_{e. exn} &= \gamma_{e1n} \cdot T_{e(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} + \gamma_{e2n} \cdot T_{e. ex0n}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $T_{e. ex0i}$ – температуры потоков воздуха, подаваемых исполнительными устройствами в зону охлаждения.

При этом коэффициенты, учитывающие влияние расходов подаваемого и отбираемого из зоны охлаждения воздуха, на основании уравнений энергетического баланса для каждого участка запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{e12} &= \frac{Q_1}{Q_2}, \quad \dots, \quad \gamma_{e1(n-1)} = \frac{Q_{n-2}}{Q_{n-1}}, \quad \gamma_{e1n} = \frac{Q_{n-1}}{Q_n}; \\ \gamma_{e22} &= \frac{Q_{ex2}}{Q_2}, \quad \dots, \quad \gamma_{e2(n-1)} = \frac{Q_{ex(n-1)}}{Q_{n-1}}, \quad \gamma_{e2n} = \frac{Q_{exn}}{Q_n}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решая систему уравнений (1) относительно $T_{ki}(x_i)$ и $T_{ei}(x_i)$ с учетом граничных условий, получим семейство функциональных зависимостей, отражающих пространственное распределение по координатам x_i температур кирпича и охлаждающего воздуха на каждом участке зоны охлаждения туннельной печи:

$$\left. \begin{aligned}
 T_{\kappa 1}(x_1) &= \Psi_{\kappa 11}(x_1) \cdot T_{\sigma, \delta x 1} + \Psi_{\kappa 21}(x_1) \cdot T_{\kappa 2}(x_2) \Big|_{x_2=0} + \Psi_{\kappa 31}(x_1) \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa 2}(x_2) &= \Psi_{\kappa 12}(x_2) \cdot T_{\sigma, \delta x 2} + \Psi_{\kappa 22}(x_2) \cdot T_{\kappa 3}(x_3) \Big|_{x_3=0} + \Psi_{\kappa 32}(x_2) \cdot T_{oc}; \\
 &\dots \\
 T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1}) &= \Psi_{\kappa 1(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{\sigma, \delta x(n-1)} + \Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{\kappa n}(x_n) \Big|_{x_n=0} + \Psi_{\kappa 3(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa n}(x_n) &= \Psi_{\kappa 1n}(x_n) \cdot T_{\sigma, \delta x n} + \Psi_{\kappa 2n}(x_n) \cdot T_{\kappa, \delta x} + \Psi_{\kappa 3n}(x_n) \cdot T_{oc}; \\
 T_{\epsilon 1}(x_1) &= \Psi_{\epsilon 11}(x_1) \cdot T_{\sigma, \delta x 1} + \Psi_{\epsilon 21}(x_1) \cdot T_{\kappa 2}(x_2) \Big|_{x_2=0} + \Psi_{\epsilon 31}(x_1) \cdot T_{oc}; \\
 T_{\epsilon 2}(x_2) &= \Psi_{\epsilon 12}(x_2) \cdot T_{\sigma, \delta x 2} + \Psi_{\epsilon 22}(x_2) \cdot T_{\kappa 3}(x_3) \Big|_{x_3=0} + \Psi_{\epsilon 32}(x_2) \cdot T_{oc}; \\
 &\dots \\
 T_{\epsilon(n-1)}(x_{n-1}) &= \Psi_{\epsilon 1(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{\sigma, \delta x(n-1)} + \Psi_{\epsilon 2(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{\kappa n}(x_n) \Big|_{x_n=0} + \Psi_{\epsilon 3(n-1)}(x_{n-1}) \cdot T_{oc}; \\
 T_{\epsilon n}(x_n) &= \Psi_{\epsilon 1n}(x_n) \cdot T_{\sigma, \delta x n} + \Psi_{\epsilon 2n}(x_n) \cdot T_{\kappa, \delta x} + \Psi_{\epsilon 3n}(x_n) \cdot T_{oc},
 \end{aligned} \right\} (5)$$

где коэффициенты, связывающие выходные координаты с управляющими воздействиями и основными возмущениями:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{\kappa li}(x_i) &= \frac{T_{\kappa li}(x_i)}{T_{\sigma, \delta x i}} = \\
 &= \frac{B_{li} \cdot \left(e^{\sigma_{\kappa li} \cdot L_i + \sigma_{\kappa 2i} \cdot x_i} - e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot L_i + \sigma_{\kappa li} \cdot x_i} \right)}{(\sigma_{\kappa li} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot L_i} - (\sigma_{\kappa 2i} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa li} \cdot L_i}}; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\Psi_{\kappa 2i}(x_i) = \frac{T_{\kappa li}(x_i)}{T_{\sigma, \delta x i}} = \frac{e^{\sigma_{\kappa li} \cdot x_i} \cdot (D_{li} - \sigma_{\kappa 2i}) - e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot x_i} \cdot (D_{li} - \sigma_{\kappa li})}{(\sigma_{\kappa li} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot L_i} - (\sigma_{\kappa 2i} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa li} \cdot L_i}}; \quad (7)$$

$$\Psi_{\kappa 3i}(x_i) = \frac{T_{\kappa 3i}(x_i)}{T_{oc}} = \Psi_{\kappa 31i} \cdot (1 - \Psi_{\kappa 32i}) \quad (8)$$

$$\Psi_{\kappa 31i} = \frac{E_{\kappa 3i}}{E_{2i}}; \quad (9)$$

$$\Psi_{\kappa 32i}(x_i) = \frac{e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot x_i} \cdot (\sigma_{\kappa li} - D_{li} + D_{li} \cdot e^{\sigma_{\kappa li} \cdot L_i}) - e^{\sigma_{\kappa li} \cdot x_i} \cdot (\sigma_{\kappa 2i} - D_{li} + D_{li} \cdot e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot L_i})}{(\sigma_{\kappa li} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa 2i} \cdot L_i} - (\sigma_{\kappa 2i} - D_{li}) \cdot e^{\sigma_{\kappa li} \cdot L_i}}; \quad (10)$$

$$\Psi_{\epsilon 1i}(x_i) = \frac{T_{\epsilon i}(x_i)}{T_{\epsilon \kappa i}} = \frac{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i + \sigma_{\epsilon 2i} \cdot x_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i + \sigma_{\epsilon 1i} \cdot x_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i})}{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i})}; \quad (11)$$

$$\Psi_{\epsilon 2i}(x_i) = \frac{T_{\epsilon i}(x_i)}{T_{\kappa \epsilon i}} = \frac{B_{2i} \cdot (e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot x_i} - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot x_i})}{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i})}; \quad (12)$$

$$\Psi_{\epsilon 3i}(x_i) = \frac{T_{\epsilon i}(x_i)}{T_{oc}} = \Psi_{\epsilon 31i} \cdot (1 - \Psi_{\epsilon 32i}(x_i)), \quad (13)$$

$$\Psi_{\epsilon 31i} = \frac{E_{\epsilon 3i}}{E_{2i}}; \quad (14)$$

$$\Psi_{\epsilon 32i}(x_i) = \frac{e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot x_i} \cdot \left(C_{2i} \cdot \frac{E_{2i}}{E_{\epsilon 3i}} - D_{2i} + (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) \cdot e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i} \right)}{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i})} - \frac{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot x_i} \cdot \left(C_{2i} \cdot \frac{E_{\epsilon 3i}}{E_{2i}} - D_{2i} + (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i}) \cdot e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i} \right)}{e^{\sigma_{\epsilon 1i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 1i}) - e^{\sigma_{\epsilon 2i} \cdot L_i} \cdot (D_{2i} + \sigma_{\epsilon 2i})}. \quad (15)$$

В свою очередь, постоянные в выражениях (6) – (15) представляют собой сложные функции характерных параметров:

$$\left. \begin{aligned} B_{1i} &= \frac{1}{\upsilon_{\kappa}} \cdot \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{\kappa i} \cdot \rho_{\kappa} \cdot c_{\kappa}}; B_{2i} = \frac{1}{\upsilon_{\epsilon i}} \cdot \frac{\alpha_i \cdot F_i}{V_{\epsilon i} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot c_{\epsilon}}; C_{2i} = \frac{k_{\epsilon i} \cdot F_{\epsilon i}}{V_{\epsilon i} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot c_{\epsilon}}; \\ D_{1i} &= A_{1i} + B_{1i}; D_{2i} = A_{2i} + B_{2i} + C_{2i}; \\ E_{\kappa 1i} &= D_{1i} - D_{2i}; E_{\kappa 3i} = C_{2i} \cdot B_{1i}; \\ E_{2i} &= D_{1i} \cdot D_{2i} - B_{1i} \cdot B_{2i}; \\ \sigma_{1,2\kappa i} &= \frac{E_{\kappa 1i} \pm \sqrt{E_{\kappa 1i}^2 + 4 \cdot E_{2i}}}{2}, \\ E_{\epsilon 1i} &= D_{2i} - D_{1i}; E_{\epsilon 3i} = C_{2i} \cdot D_{1i}; \\ \sigma_{1,2\epsilon i} &= \frac{-E_{\epsilon 1i} \pm \sqrt{E_{\epsilon 1i}^2 + 4 \cdot E_{2i}}}{2}. \end{aligned} \right\}$$

В связи с тем, что моделируемая часть тепловой установки работает по принципу противотока, имеет место взаимовлияние участков зоны охлаждения, а значит, граничные условия зависят от состояния параметров на соседних участках, которые заранее неизвестны. Тогда, рассматривая систему (3) на границах участков и принимая во внимание выражения (2) – (4), численные значе-

ния граничных условий можем определить из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 T_{\kappa 1}(x_1)|_{x_1=0} &= \Psi_{\kappa 11}(x_1)|_{x_1=0} \cdot T_{\kappa \text{ex}01} + \Psi_{\kappa 21}(x_1)|_{x_1=0} \cdot T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=0} + \Psi_{\kappa 31}(x_1)|_{x_1=0} \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=0} &= \Psi_{\kappa 12}(x_2)|_{x_2=0} \cdot \gamma_{\kappa 12} \cdot T_{\kappa 1}(x_1)|_{x_1=L_1} + \Psi_{\kappa 22}(x_2)|_{x_2=0} \cdot T_{\kappa \text{ex}02} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 22}(x_2)|_{x_2=0} \cdot T_{\kappa 3}(x_3)|_{x_3=0} + \Psi_{\kappa 32}(x_2)|_{x_2=0} \cdot T_{oc}; \\
 &\dots \\
 T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} &= \Psi_{\kappa 1(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} \cdot \gamma_{\kappa 1(n-1)} \cdot T_{\kappa(n-2)}(x_{n-2})|_{x_{n-2}=L_{n-2}} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} \cdot \gamma_{\kappa 2(n-1)} \cdot T_{\kappa \text{ex}0(n-1)} + \Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} \cdot T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=0} + \Psi_{\kappa 3(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=0} \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=0} &= \Psi_{\kappa 1n}(x_n)|_{x_n=0} \cdot \gamma_{\kappa 1n} \cdot T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} + \Psi_{\kappa 1n}(x_n)|_{x_n=0} \cdot \gamma_{\kappa 2n} \cdot T_{\kappa \text{ex}0n} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 2n}(x_n)|_{x_n=0} \cdot T_{\kappa \text{ex}} + \Psi_{\kappa 3n}(x_n)|_{x_n=0} \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa 1}(x_1)|_{x_1=L_1} &= \Psi_{\kappa 11}(x_1)|_{x_1=L_1} \cdot T_{\kappa \text{ex}01} + \Psi_{\kappa 21}(x_1)|_{x_1=L_1} \cdot T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=0} + \Psi_{\kappa 31}(x_1)|_{x_1=L_1} \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa 2}(x_2)|_{x_2=L_2} &= \Psi_{\kappa 12}(x_2)|_{x_2=L_2} \cdot \gamma_{\kappa 12} \cdot T_{\kappa 1}(x_1)|_{x_1=L_1} + \Psi_{\kappa 22}(x_2)|_{x_2=L_2} \cdot \gamma_{\kappa 22} \cdot T_{\kappa \text{ex}02} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 22}(x_2)|_{x_2=L_2} \cdot T_{\kappa 3}(x_3)|_{x_3=0} + \Psi_{\kappa 32}(x_2)|_{x_2=L_2} \cdot T_{oc}; \\
 &\dots \\
 T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} &= \Psi_{\kappa 1(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} \cdot \gamma_{\kappa 1(n-1)} \cdot T_{\kappa(n-2)}(x_{n-2})|_{x_{n-2}=L_{n-2}} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} \cdot \gamma_{\kappa 2(n-1)} \cdot T_{\kappa \text{ex}0(n-1)} + \Psi_{\kappa 2(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} \cdot T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=0} + \Psi_{\kappa 3(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} \cdot T_{oc}; \\
 T_{\kappa n}(x_n)|_{x_n=L_n} &= \Psi_{\kappa 1n}(x_n)|_{x_n=L_n} \cdot \gamma_{\kappa 1n} \cdot T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1})|_{x_{n-1}=L_{n-1}} + \\
 &+ \Psi_{\kappa 1n}(x_n)|_{x_n=L_n} \cdot \gamma_{\kappa 2n} \cdot T_{\kappa \text{ex}0n} + \Psi_{\kappa 2n}(x_n)|_{x_n=L_n} \cdot T_{\kappa \text{ex}} + \Psi_{\kappa 3n}(x_n)|_{x_n=L_n} \cdot T_{oc};
 \end{aligned}$$

Представленное математическое описание позволяет получить участок температурной кривой туннельной печи, соответствующей этапу охлаждения. Вычисленные с помощью представленных выражений составляющие кривой охлаждения объединим, используя следующую зависимость:

$$T_{\kappa}(x) = T_{\kappa 1}(x_1) + T_{\kappa 2}(x_2 + L_1) + \dots + T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1} + \sum_{i=1}^{n-2} L_i) + T_{\kappa n}(x_n + \sum_{i=1}^{n-1} L_i).$$

Аналогично получим зависимость изменения температуры воздуха по длине всей зоны охлаждения:

$$T_{\kappa}(x) = T_{\kappa 1}(x_1) + T_{\kappa 2}(x_2 + L_1) + \dots + T_{\kappa(n-1)}(x_{n-1} + \sum_{i=1}^{n-2} L_i) + T_{\kappa n}(x_n + \sum_{i=1}^{n-1} L_i).$$

В качестве примера рассмотрим вариант зоны охлаждения, разделенной на 4 участка. При этом процесс характеризуется параметрами, представленными в табл. 1.

Параметры процесса охлаждения керамического кирпича

Параметр	<i>i</i>			
	1	2	3	4
$v_{кз}$, м/с	$5.6 \cdot 10^{-4}$			
$Q_{вxi}$, м ³ /с	2.1	0.3	0.48	0.3
$Q_{выxi}$, м ³ /с	0			3.18
L_i , м	5	6		
$V_{ки}$, м ³	4.875	5.85		
V_{ei} , м ³	23.73	28.48		
F_i , м ²	158.65	190.4		
F_{ei} , м ²	38.1	45.7		
$\rho_{кз}$, кг/м ³	1800			
$\rho_{вз}$, кг/м ³	1.205			
$c_{кз}$, Дж/(кг·°C)	916			
$c_{вз}$, Дж/(кг·°C)	1017			
k_{ci}	1.2	0.52	0.19	0.27
k_{Ti}	1.11	1.325	1.46	1.59
$\alpha_{и}$, Вт/(м ² ·°C)	5.6			
$\sum_{j=1}^r \frac{\delta_j}{\lambda_j}$, м ² ·°C/Вт	0.51			
$T_{к.вх}$, °C	–			995
$T_{в.вх0i}$, °C	20			
$T_{ос}$, °C	20			

В результате расчета с использованием представленных выше математических зависимостей получен участок температурной кривой кирпича, соответствующий зоне охлаждения (рис. 2). Следует отметить, что маркерами обозначены значения температуры в характерных точках (на входах и выходах рассматриваемых четырех участков) зоны охлаждения действующей туннельной печи [11], которая работает в аналогичных расчетным технологических условиях. Оценим точность математической модели статического режима работы зоны охлаждения керамического кирпича. Произведя сравнение в указанных точках расчетных значений T_k и значений $T_{кн}$ температур кирпича, полученных на реальной установке, можем увидеть (см. табл. 2), что максимальная погрешность δ наблюдается при $x=0$ и составляет 1.63 %. Поэтому можно сделать вывод об адекватности разработанной математической модели.

Таблица 2

Оценка точности математической модели статического режима работы зоны охлаждения керамического кирпича

Параметр	<i>x</i> , м				
	0	5	11	17	23
$T_{кн}$, °C	92	280	513	658	995
$T_{кз}$, °C	93.5	279.3	511.9	661.7	995
δ , %	1.63	–0.25	–0.21	0.56	0

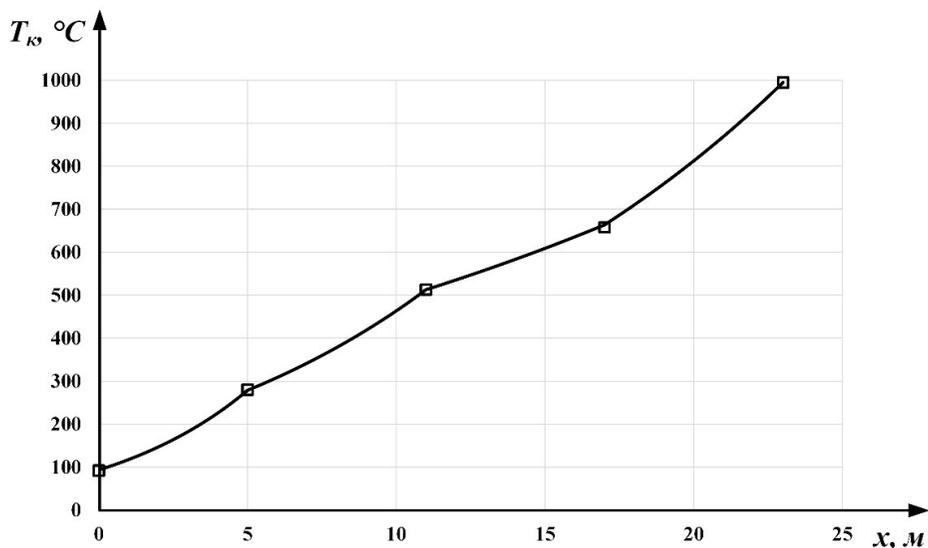


Рис. 2. Температурная кривая кирпича в зоне охлаждения туннельной печи

Таким образом, полученные выражения позволяют с достаточной для инженерной практики точностью рассчитать кривые распределения температур кирпича и охлаждающего воздуха по длине зоны охлаждения. Предложенный подход может быть использован при проектировании туннельных печей для выбора наиболее энергоэффективной конфигурации системы распределения теплоносителей, а также подбора необходимого технологического оборудования. Кроме того, использование предложенного математического описания при автоматизации рассматриваемого процесса существенно расширяет возможности управления, что позволит добиться требуемых показателей качества работы тепловых установок, тем самым снизив количество брака и энергетические затраты на керамическом производстве.

Выводы

1. Выполнен анализ технологического процесса охлаждения обожженного керамического кирпича, который представляет собой объект управления с распределенными по длине зоны охлаждения туннельной печи параметрами. Обозначено, что основной интегральной характеристикой, наилучшим образом отражающей соответствие параметров процесса технологическим требованиям, является температурная кривая.

2. Разработано математическое описание статического режима работы зоны охлаждения кирпича с распределенными подачей и отбором охлаждающего агента в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений первого порядка и их граничных условий.

3. Найдено решение системы уравнений, позволяющее моделировать процессы для конфигураций схемы распределения теплоносителей с разным количеством точек подачи и отбора охлаждающего агента.

4. Представлен подход к определению граничных условий для каждого участка зоны охлаждения.

5. Полученные результаты предоставляют возможность создания

эффективных систем управления процессом охлаждения керамического кирпича в соответствующей зоне туннельной печи, позволяющих повысить качество продукции и сократить энергетические затраты производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Нохратян К.А.* Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 604 с.
2. *Китайцев В.А., Гурвич Р.М., Корольков И.В.* Теплотехника и тепловые установки в промышленности строительных материалов. М.: Промстройиздат, 1954. 496 с.
3. *Наумов М.М., Кашкаев И.С., Буз М.А., Шейнман Е.Ш.* Технология глиняного кирпича. М.: Издательство литературы по строительству, 1969. 269 с.
4. *Гудков К.В., Анцев В.Ю., Шафорост А.Н., Толоконников А.С., Горынин А.Д.* Повышение качества продукции кирпичного производства на основе технологического реинжиниринга // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 490–494. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-485-486. EDN: ZHWZFQ
5. *Бухмиров В.В., Гнездов Е.Н., Корвяков П.А., Ракутина Д.В.* Исследование режима обжига керамических изделий в туннельных печах кирпичного производства // Промышленные печи и трубы. 2006. № 1. С. 79–83. EDN: PXKLLX
6. *Лопатина М.В., Антонычев С.В.* Комплексное теплотехнологическое обследование туннельной печи для обжига кирпича // Строительные материалы. 2016. № 12. С. 34–37. EDN: XHFQDF
7. *Гнездов Е.Н., Гнездов Н.Е., Марченко Ю.И., Пережигин Е.А., Лопатина М.В., Цветкова М.С.* Технологический энергоаудит туннельной печи для обжига керамических изделий // Строительные материалы. 2012. № 5. С. 54–57. EDN: NNREYJ
8. *Тугов В.В., Сабанчин В.Р.* Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография. Оренбург: ОГУ, 2019. 150 с.
9. *Сабанчин В.Р.* Автоматизированная система управления процессом обжига керамического кирпича на основе многомерного логического регулятора: дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2018. 166 с. EDN: JGGXHG
10. *Чаудхари Р.Р.* Автоматизация линии перемещения продукции кирпично-черепичного производства в зоне сушки и обжига: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 119 с.
11. *Умаралиев Р.Ш.* Автоматизация и моделирование технологического процесса обжига керамического кирпича в туннельной печи: дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 125 с. EDN: QFWGWN

Статья поступила в редакцию 13.03.2025

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE STATIC OPERATIONAL MODE OF THE CERAMIC BRICK COOLING ZONE IN A TUNNEL KILN WITH DISTRIBUTED SUPPLY OF COOLING AGENT

*M.A. Nazarov, A.A. Zavarzin*¹

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

E-mail: nazarovm86@yandex.ru, andrew163ru@mail.ru

Abstract. *The analysis of the technological process of cooling ceramic bricks in a tunnel kiln as a control object with parameters distributed along the longitudinal coordinate is performed. It is revealed that the process under consideration has a significant effect on the strength of the finished brick, while research in the field of developing effective methods and means of controlling this stage is practically absent. In the course of the work, the following were determined: a vector of output coordinates, including the temperatures of the brick and cooling air and their gradients along the longitudinal coordinate of the kiln, a vector of control actions consisting of the flow rates of the supplied cooling air and the extracted air, a vector of disturbing actions - the temperature of the brick at the entrance to the cooling zone, the air supplied to the cooling zone, and the environment. A calculation scheme for the process of reducing the temperature of ceramic bricks has been developed taking into account an arbitrary number of points of supply and extraction of air to the cooling zone, which determines the number and size of its sections. Taking into account the accepted assumptions and simplifications, a mathematical description of the static mode of operation of the cooling zone with distributed supply and selection of the cooling agent was performed in the form of a system of non-homogeneous differential equations with the corresponding boundary conditions, which is problem-oriented towards the synthesis of automatic control systems. Their solution made it possible to determine the mathematical operators that link the output coordinates with the control and main disturbing effects. In the future, the results of the work can be used to create effective control systems for the brick cooling process, which will improve the quality of products and reduce energy costs for production.*

Keywords: *ceramic brick, tunnel kiln, cooling zone, mathematical model, control object with distributed parameters.*

REFERENCES

1. *Nohratyan K.A. Sushka i obzhig v promyshlennosti stroitel'noj keramiki [Drying and Firing in the Industry of Construction Ceramics]. M.: Gosudarstvennoe izdatelstvo literatury po stroitelstvu, arhitekture i stroitelnyim materialam, 1962. 604 p. (In Russian)*
2. *Kitajcev V.A., Gurchich R.M., Korolkov I.V. Teplotekhnika i teplovyje ustanovki v promyshlennosti stroitelnyh materialov [Thermal Engineering and Thermal Installations in*



© The Author(s), 2025

¹ *Maxim A. Nazarov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction. Andrey A. Zavarzin, Engineer, Dept. of Mechanization, Automation, and Energy Supply in Construction.*

- the Industry of Construction Materials]. M.: Promstrojizdat, 1954. 496 p. (In Russian)
3. *Naumov M.M., Kashkaev I.S., Buz M.A., Shejnman E.Sh.* Tekhnologiya glinyanogo kirpicha [Technology of Clay Brick]. M.: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1969. 269 p. (In Russian)
 4. *Gudkov K.V., Ancev V.Yu., Shaforost A.N., Tolokonnikov A.S., Gorynin A.D.* Povyshenie kachestva produkcii kirpichnogo proizvodstva na osnove tekhnologicheskogo reinzhiniringa [Improving the Quality of Brick Production Based on Technological Reengineering] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. 2023. Vyp. 9. Pp. 490–494. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-9-485-486. (In Russian)
 5. *Buhmirov V.V., Gnezdov E.N., Korvyakov P.A., Rakutina D.V.* Issledovanie rezhima obzhiga keramicheskikh izdelij v tunnelnyh pechah kirpichnogo proizvodstva [Study of the Firing Regime of Ceramic Products in Tunnel Kilns of Brick Production] // Promyshlennye pechi i trubyy. 2006. No. 1. Pp. 79–83. (In Russian)
 6. *Lopatina M.V., Antonychev S.V.* Kompleksnoe teplotekhnologicheskoe obsledovanie tunnelnoj pechi dlya obzhiga kirpicha [Comprehensive Thermal Technology Survey of a Tunnel Kiln for Firing Brick] // Stroitelnye materialy. 2016. No. 12. Pp. 34–37. (In Russian)
 7. *Gnezdov E.N., Gnezdov N.E., Marchenko Yu.I., Perezhigin E.A., Lopatina M.V., Cvetkova M.S.* Tekhnologicheskij energoaudit tunnelnoj pechi dlya obzhiga keramicheskikh izdelij [Technological Energy Audit of a Tunnel Kiln for Firing Ceramic Products] // Stroitelnye materialy. 2012. No. 5. Pp. 54–57. (In Russian)
 8. *Tugov V.V., Sabanchin V.R.* Avtomatizaciya processa obzhiga keramicheskogo kirpicha: monografiya [Automation of the Firing Process of Ceramic Brick]. Orenburg: OGU, 2019. 150 p. (In Russian)
 9. *Sabanchin V.R.* Avtomatizirovannaya sistema upravleniya processom obzhiga keramicheskogo kirpicha na osnove mnogomernogo logicheskogo regul'yatora [Automated Control System for the Firing Process of Ceramic Brick Based on a Multidimensional Logic Controller]: dis. ... kand. tekhn. nauk. Orenburg, 2018. 166 p. (In Russian)
 10. *Chaudhari R.R.* Avtomatizaciya linii peremeshcheniya produkcii kirpichno-cherepichnogo proizvodstva v zone sushki i obzhiga [Automation of the Product Movement Line in the Brick and Tile Production Zone During Drying and Firing]: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2013. 119 p. (In Russian)
 11. *Umaraliev R.Sh.* Avtomatizaciya i modelirovanie tekhnologicheskogo processa obzhiga keramicheskogo kirpicha v tunnel'noj pechi [Automation and Modeling of the Technological Process of Firing Ceramic Bricks in a Tunnel Kiln]: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2012. 125 p.

Original article submitted 13.03.2025