



## ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ В ТУННЕЛЬНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА КИРПИЧЕЙ СО СВОДОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ГОРЕЛОК

Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

vafdanil@yandex.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ. Несмотря на большой объем крупнопанельной и монолитной застройки современных городов уровень эстетических требований к домостроению с применением новых отделочных строительных материалов приводит и к увеличению спроса керамического кирпича. Для решения задачи национального проекта «доступное жилье» необходимо нарастить производство керамического кирпича местного производства. Для этого необходимо модернизировать существующие или строить новые кирпичные заводы. При этом желательно использовать новые технологии и способы производства, обеспечивающие качество выпускаемого кирпича. Свойства кирпича в основном формируются в процессе обжига, который в то же время является наиболее сложным и требующим большой затраты теплоты этапом производства. Необходимое качество строительной керамики во многом зависит от обеспечения определенного распределения температуры в процессе обжига во время перемещения вагонов с кирпичом вдоль туннельной печи. Поэтому работы, посвященные обеспечению необходимого распределения температуры в различных зонах туннельных печей с различными размещениями газовых горелок, являются актуальными с практической точки зрения. ЦЕЛЬЮ работы является экспериментальное определение температуры в разных местах объема туннельной печи в ходе всего перемещения вагона с кирпичами в действующей печи. МЕТОД. Датчики температуры с дистанционной передачей информации были размещены на садках кирпичей перемещаемого вдоль печи вагона, сигналы от которых регистрировались многоканальным измерителем во время всего цикла обжига. РЕЗУЛЬТАТЫ измерений представлены в виде графиков зависимостей температуры от различных датчиков в зависимости от времени процесса обжига. По результатам опытов сделаны выводы относительно улучшения качественной тепловой обработки кирпичей и уменьшения брака производства.

**Ключевые слова:** Строительная керамика; обжиг; теплота; температура; горение; теплообмен; энергия.

**Для цитирования:** Вафин Д.Б., Мукатдаров А.А., Мукатдарова Д.А. Тепловое состояние в туннельной печи обжига кирпичей со сводовым расположением горелок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

## THERMAL CONDITION IN A TUNNEL BRICK KILNING KILN WITH VOCCULATED BURNERS

Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

vafdanil@yandex.ru

**Abstract:** Despite the large volume of large-panel and monolithic construction in modern cities, the level of aesthetic requirements for house construction using new finishing building materials also leads to an increase in the demand for ceramic bricks. To solve the problem of the national project “affordable housing” it is necessary to increase the production of locally produced ceramic bricks. To do this, it is necessary to modernize existing brick factories or build new ones. In this case, it is desirable to use new technologies and production methods that ensure the quality of the produced bricks. The properties of bricks are mainly formed during the firing process, which at the same time is the most complex and heat-intensive

production stage. The required quality of building ceramics largely depends on ensuring a certain temperature distribution during the firing process while moving cars with bricks along the tunnel kiln. Therefore, work devoted to ensuring the required temperature distribution in different zones of tunnel furnaces with different placements of gas burners is relevant from a practical point of view. **THE PURPOSE** of the work is to experimentally determine the temperature in different places of the tunnel furnace volume during the movement of the car in the operating furnace. **METHOD.** Temperature sensors with remote information transmission were placed on the brick cages of a carriage moving along the kiln, the signals from which were recorded by a multi-channel meter during the entire firing cycle. The measurement results are presented in the form of graphs of temperature dependences from various sensors depending on the time of the firing process. Based on the results of the experiments, conclusions were drawn regarding improving the quality of heat treatment of bricks and reducing production defects. версия резюме (аннотации) – независимый от статьи источник информации.

**Keywords:** Construction ceramics; burning; heat; temperature; combustion; heat exchange; energy.

**For citation:** Vafin D.B., Mukatdarov A.A., Mukatdarova D.A. Thermal condition in a tunnel brick kilning kiln with vocculated burners. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 184-193. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-184-193.

### **Введение (Introduction)**

В настоящее время наибольшим спросом пользуются разноцветные керамические кирпичи высокого качества для отделки наружных поверхностей стен строящихся зданий. Для производства кирпичей надлежащего качества необходимо использовать передовые технологии, современные методы и оптимальные способы производства. Наиболее ответственным и наибольшим потреблением теплоты процессом при производстве кирпича является процесс обжига. В процессе высокотемпературной обработки кирпича-сырца и формируются требуемые свойства кирпича, такие как стойкость против механических, физических и атмосферных воздействий.

Для происхождения ряда физико-химических превращений, вызывающих изменение свойств кирпича-сырца в процессе обжига необходимо поддерживать скорость подъема температуры до необходимого уровня, длительность выдержки на данном уровне, состав газовой среды и скорость охлаждения. Степень готовности керамического кирпича можно достичь как в процессе быстрого обжига при высокой конечной температуре, так и при длительном обжиге при более низкой температуре. Максимальная температура при обжиге ограничивается неравномерностью поля температуры в объеме печи и в объеме отдельного кирпича. Выдержка при максимальной температуре обеспечивает выравнивание температуры по объему кирпича и по сечению канала печи, что способствует равномерному распределению жидкой фазы в кирпиче. Поле температуры в объеме канала обжига печи зависит от конструкции печи, типа и расположения газовых горелок, так же от способа формирования садок в перемещаемых вагонах. При возникновении большой неравномерности нагрева садки увеличивается доля некачественной продукции.

Цель исследования заключается в измерении температуры в разных зонах объема действующей туннельной печи за время всего цикла обжига керамического кирпича. Научная значимость исследования заключается в установлении особенностей изменения температурного режима в объеме туннельной печи в зависимости от управляющих параметров. Это позволит в дальнейшем проверить достоверность расчетных методов для подбора режима обжига, позволяющего обеспечения требуемого качества строительной керамики. Практическая значимость исследования заключается в возможности уменьшения доли некачественного кирпича

В настоящее время для обжига строительных керамических кирпичей строятся только печи непрерывного действия такие как, кольцевые и туннельные печи. Из-за больших затрат физического труда при применении кольцевых печей, имеющейся неравномерности температуры по сечению канала обжига и из-за трудности механизации работ при проектировании отдается предпочтение туннельным печам. Туннельная печь состоит из длинного прямолинейного канала, вдоль которого перемещаются вагоны с садками обжигаемых кирпичей. Теплоноситель,

представляющий смесь продуктов сгорания газообразного топлива и воздуха движется навстречу перемещающимся вагонам. Физические и химические процессы происходят при теплообмене обтекающего перемещаемых садок кирпичей теплоносителя. Обычно условно канал туннельной печи разделяют на зону подогрева (подготовки), обжига и охлаждения (рис.1).

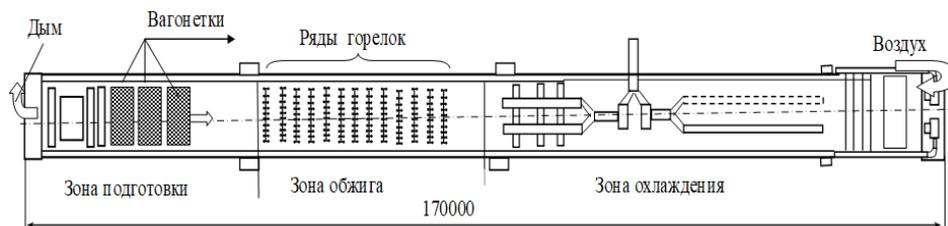


Рис. 1. Упрощенная схема туннельной печи: вид сверху Fig 1. Simplified diagram of a tunnel kiln: top view

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Сквозной канал туннельной печи практически полностью заполнен вагонами с садками кирпичей. Зона обжига располагается в средней части канала, где расположены ряды скоростных газовых горелок. Имеются печи с размещением горелок на боковых стенах или на своде печи. С помощью вентилятора нагнетается воздух в конец зоны охлаждения. Нагреваясь остывающими садками кирпичей, воздух в зоне обжига участвует в процессе горения газовой смеси подаваемой через горелки. В зоне обжига кирпичи подогреваются до максимальной температуры, затем в конце зоны обжига и в начале зоны охлаждения они выдерживаются при высокой температуре, где и происходят основные физико-химические процессы. Технология получения керамических материалов известна давно, в частности она описана в работе [1] и ряде других работ, например в [2].

Загруженный вагон из сушильной камеры подается к торцу зоны охлаждения печи. и толкателем заталкивается в печь. Все вагоны, находящиеся в канале печи перемещаются на длину данного вагона. Теплообмен между садками кирпичей на вагонах и теплоносителем происходит по принципу противотока. Часть нагретого воздуха из зоны охлаждения может отбираться вентилятором для подачи в сушильную камеру. В зоне охлаждения садки кирпичей достаточно быстро остывают до температуры перехода кирпичей из пиропластического состояния в хрупкое состояние. После этого при температурах модификационных превращений кирпича интенсивность остывания уменьшается.

Некоторые вопросы технологического обжига керамического кирпича в туннельной печи и обоснование необходимости внедрения автоматизации управления туннельной печью рассмотрены в работе [3]. В работе [4] предложен метод оптимизации обжига керамического кирпича путем организации зон рециркуляции продуктов сгорания в туннельной печи с применением жаровых вентиляторов. В статье [5] рассматривается имитационное моделирование технологических процессов термической обработки. В работе [6] предлагается упрощенная математическая модель для определения температурного режима в туннельной печи для обжига керамического кирпича. В статье [7] анализируется моделирование тепловых процессов в регенеративно утилизаторах теплоты уходящих дымовых газов в туннельных печах. Некоторые вопросы установления связей между разрежением в канале туннельной печи параметрами продуктов сгорания газа через регулирующие щели дифференциальными уравнениями рассмотрены в работе [8]. Анализ работы туннельных печей в целях автоматизации управления процессом обжига кирпичей приводится в монографии [9]. В работах [10 -12] имеется анализ существующих систем автоматизации в печах обжига. Некоторые результаты численного и экспериментального исследования в канале туннельной печи приводится в работе [13]., однако конструкция данной печи существенно отличается от конструкции печи, исследованной в нашей работе. В статье [14] приводится пример использования программного комплекса Midas Civil 2011 для исследования температурного и термически напряженного состояния строительного бетона. Модель прогнозирования и управления тепловым потоком в большой доменной печи предлагается в работе [15]. Анализ методов определения температурного режима в промышленных печах и обзор литературы по этой тематике имеется в [16]. Результаты

изучения тепловых характеристик барабанных печей приводится в работе [17]. В статье [18] обсуждаются вопросы проведения опытов по измерению температуры в промышленных печах небольших размеров.

В данной работе приводятся некоторые результаты экспериментального измерения температуры в канале туннельной печи с использованием температурных датчиков, размещенных на садках кирпичей на вагонах, перемещаемых вдоль печи. Основным изделием завода, находящегося около города Казань являются кирпичи 1 НФ 250×120×65 и 1,4 НФ 250×120×88 30% пустотности. Сырьем является 3 типа глины влажностью формования 22,4% относительно сухости с относительной влажностью на выходе из сушилки меньше 3%.

Число кирпичей 1,4 НФ в перемещаемом вагоне 10752 шт. 8 штабели в загрузке и 3 загрузки/вагон.. Ритмичность работы печи в определенный момент времени равна 9,1 вагонов в день, что дает ритмичность в 53 минут на одну загрузку печи. Число кирпичей в вагоне 1НФ 14784 шт. Ритмичность в определенный момент времени также составляет 53 мин/загрузка. Длина печи примерно 172 м, внутренняя ширина канала равна 9 м. Внутри печи одновременно находится 41 вагон. Размер вагона печи 4200 мм в длину (3 загрузки) и 8845 мм в ширину. Туннель ожидания составляет 19 позиций вагона в печи.

#### Материалы и методы (Materials and methods)

Печь и туннельная сушилка работают на природном газе. Часть продуктов сгорания из систем ВТ и НТ установленных на печи рекуперации и из подвагонеточной вытяжки направляются в сушилку. Для сушилки обычно газов рекуперации хватает, хотя установлены 2 дополнительных теплогенератора. Вытяжка печи производится через щель в своде с помощью основного вентилятора с вариатором скорости и с ручной заслонкой. Имеется и вентилятор разбавления, расположенного на стенке вытяжки который включается не часто. температура вытяжки равна 98°C. Имеется подвагонеточная вытяжка из двух вытяжных дымоходов с ручной заслонкой и с вытяжной трубой. В зоне ожидания два вентилятора всасывают примерно 16,7 м<sup>3</sup>/с воздуха из пяти щелей в своде и из пяти боковых щелей для смешивания перед обжигом.

Одиннадцать обычных рядов и 2 сдвоенные ряда горелок типа BERNINI (всего 189 горелок) расположены на своде зоны обжига печи и регулируются на месте шкафом управления. Для подачи воздуха на горение природного газа используется один общий вентилятор на своде печи мощностью 7,5 кВт и еще 18 вентиляторов мощностью 3 кВт. Средний расход горелки: 0,3 кг сух.возд/с (0,3 м<sup>3</sup>/с) при 3,3 °С.

Проектная температура обжига 980 °С с выдержкой в зоне наибольшей температуры обжига от 9 до 13 ч. Для контроля процесса обжига кирпичей вдоль канала под сводом печи расположены штатные 25 термодатчики и датчики давления.

Для исследования температурного поля вдоль канала туннельной печи на садках вагона кирпичей были размещены термопары CeriDry с системой радиотелеметрии типа Datarag Kiln Tracker. Вид поперечного сечения канала туннельной печи с вагоном садками кирпичей, размещенными на них термопарами показан на рис. 2.

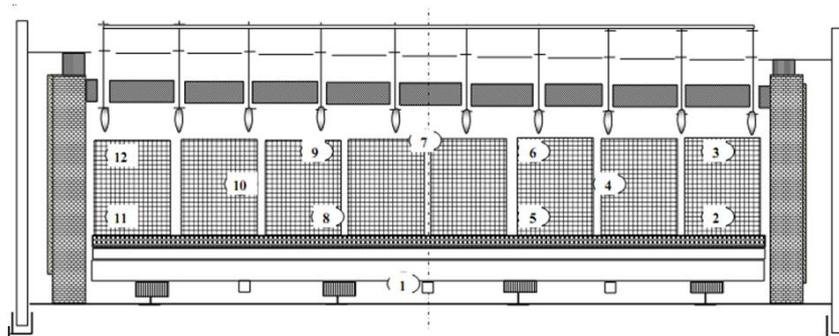


Рис. 2. Вид поперечного сечения канала печи с размещенными на садках термопарами  
 Fig. 2. Cross-sectional view of the furnace channel with thermocouples placed on the cages  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В процессе перемещения вагона вдоль всей печи сигналы высокой частоты от термопар передаются в дистанционный регистратор с персональным компьютером, который был расположен на тележке перемещающейся синхронно с вагоном рядом за пределами канала печи. С опцией FullRadio регистратор может быть настроен и считывать в режиме реального времени по беспроводной связи посредством двунаправленной радиопередачи Компьютер регистрировал данные температуры от отдельных термопар в

разные моменты времени перемещения вагона вдоль всей печи в процессе обжига. Данные считывались использованием программного обеспечения TMI-Orion Qlever. Интерфейс связи с ПК представляет собой электронное устройство, которое связывает регистратор с персональным компьютером, обеспечивая тем самым двустороннюю передачу данных в программу и чтение регистраторов.

Такие измерения проводились для нескольких проходов вагонов с кирпичами в течении определенного периода эксплуатации печи. Результаты после обработки можно получить через проводной интерфейс.

#### **Результаты и обсуждение (Results and Discussions)**

На рисунке 3 показана кривая контроля температуры в верхней части туннеля вдоль всей печи, построенная по показаниям штатных датчиков температуры, установленных под сводом туннеля в разных местах. Сплошная линия соответствует реальным значениям для данного прохода вагонов, штриховая – стандартная. По оси абсцисс показаны положения вагона вдоль печи. По этим показаниям оператор должен поддерживать необходимый температурный режим в туннеле печи. Однако датчики показывают температуру только в верхней части канала, поэтому по ним не удастся определить температуру в отдельных областях туннеля и проследить за равномерностью нагрева отдельных частей. Поэтому и было решено провести опыты по установлению температурного состояния в разных местах.

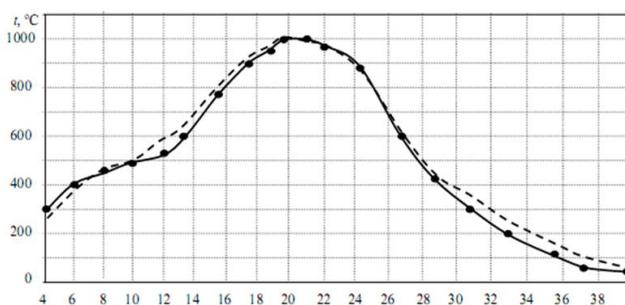


Рис. 3. График изменения температуры вдоль туннеля по показаниям штатных датчиков температуры (кривая контроля работы печи) \*Источник: Составлено авторами

Fig. 3. Graph of temperature changes along the tunnel according to the readings of standard temperature sensors (Kiln operation control curve) Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показаны графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона вдоль туннеля печи, построенные по данным разных термопар, места размещения которых показаны на рисунке 2. Термопара №1 размещена под вагонеткой. Термопары №3, №6, №7, №9, №12 были расположены в верхних частях садок, причем термопара №7 – над 4-й садкой с края. График, построенный по данным 7-й термопары, начерчен штрих пунктирной линией, а остальные графики верхних термопар – сплошной линией. Термопары № 2, №5, №8, №11 размещены внизу (штриховые кривые), а термопары № 4 и №10 – на середине двух садок (пунктирные кривые). Как видно из рис. 4, графики, построенные по данным термопар № 4 и №10 практически накладываются друг на друга. График, построенный по данным термопары №7 наиболее близко похож на график штатных датчиков (рис. 3).

На рисунке 5 представлены графики изменения температуры поперек туннеля в области зоны обжига печи.

Общий цикл обжига составляет от 100 до 115 часов. Ритмичность в определенный момент времени ~53 минут при средней ритмичности 49,5 минут.

Температура кирпичей и вагонов на входе в зону подготовки близки к температуре окружающей среды. На входе в печь через ворота входного шлюза вытяжным вентилятором под вагоном №1 и вентилятором печи всасывается свежий воздух. Расход утечек на входе в печь составляет около 3,2 м<sup>3</sup>/с при температуре 29 °С. Если своевременно отрегулировать высоту входной двери шлюза печи и добиться герметичности прохода толкателя на уровне ворот можно уменьшить охлаждение кирпичей свежим воздухом перед их попаданием в печь и увеличить производительность вытяжных вентиляторов.

График на рисунке 4, построенный по показаниям датчика №1 характеризует тепловое состояние подвагонеточного канала. Максимально достигнутая температура в канале 110 °С в конце зоны обжига свидетельствует об эффективности подвагонеточного

охлаждения.

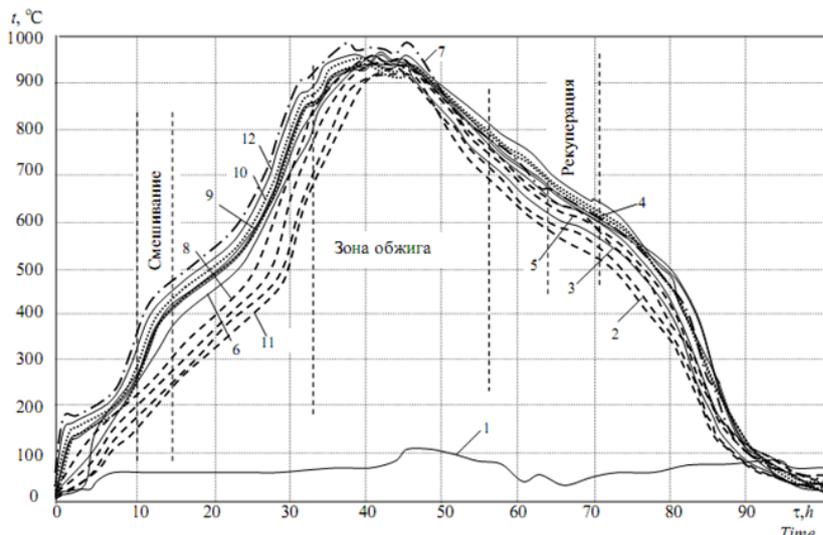


Рис. 4. Графики изменения температуры в зависимости от времени перемещения вагона по туннелю печи

Fig. 4. Graphs of temperature changes depending on the time of movement of the car through the furnace tunnel

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

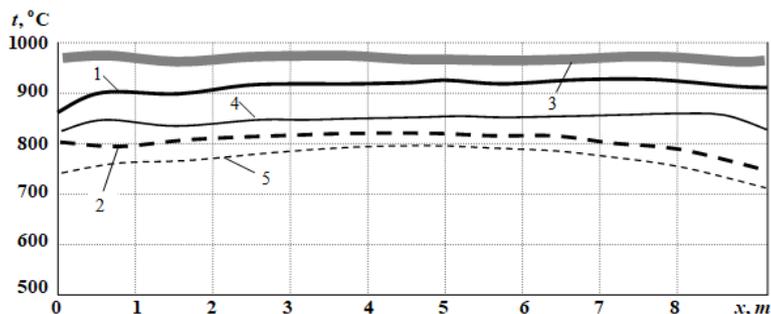


Рис. 5. Изменение температуры в поперечном сечении печи: 1, 2 – на входе в зону обжига сверху и снизу соответственно; 3 – в средней части зоны обжига; 4, 5 – на выходе из зоны обжига сверху и снизу печи соответственно

Fig. 5. The temperature change in the cross section of the furnace: 1, 2 – at the entrance to the firing area at the top and below, respectively; 3 – in the middle part of the firing zone; 4, 5 – at the exit from the firing zone at the top and below of the furnace, respectively

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как видно из рисунка 4 после входа в зону подготовки кирпичи наверху загрузки быстро нагреваются за 1 час от температуры 25 °С до 200 °С (сплошные кривые). Температуры нижних рядов загрузки начинают отставать. Перед обжигом 2 вентилятора всасывают воздух через 5 боковых щелей с одной и с другой стороны печи для подачи воздуха в 5 щелей в своде для смешения. При этом перед зоной смешения происходит некоторое выравнивание температуры низа и верха загрузки. Наверху загрузки градиент увеличения температуры втянутым с боку холодным воздухом уменьшается, а внизу загрузки кирпичи нагреваются всасываемым в своде горячим воздухом. В конце зоны подготовки температура изделий растет еще быстрее, при этом отставание температуры нижних рядов сохраняется.

После зоны смешивания перед зоной обжига разница температур между верхом и низом загрузки увеличивается, достигнув значений  $\Delta t = 250...270$  °С.

В зоне обжига достигнута максимальная температура ~996 °С, при этом разность температур поперек сечения канала и между верхом и низом загрузки уменьшается, показания всех термопар укладываются в пределах толщины кривой 3 (рис. 5). В зоне обжига не удается нагнать запаздывание температуры нижних рядов кирпичей. Вся загрузка находится при необходимой температуре выдержки только в середине зоны обжига. Это можно объяснить тем, что в порталной печи зона обжига находится в разреженном состоянии, что приводит к затруднению обжига низа загрузки. Кроме этого расположение горелок на своде приводит к уменьшению уровня температуры продуктов

сгорания внизу туннеля печи.

Быстрое охлаждение после зоны обжига состоит из рядов воздухопроводов с 5-ю соплами, что в общем составляет 40 сопел. Каждый ряд имеет вентилятор быстрого охлаждения. 5 рядов высокотемпературной рекуперации (ВТ) из полурампы по 5 стаканов на каждой, что составляет 50 стаканов в общем. Каждая полурампа ВТ обладает своей ручной заслонкой. Воздуховоды рекуперации ВТ с правой и левой стороны соединены вентилятором рекуперации ВТ. Для обеспечения ритмичности работы печи надо бы автоматизировать регулировку заслонок рампы быстрого охлаждения по температуре в зоне охлаждения.

После выхода из зоны обжига температура кирпичей остается выше температуры газов (кривая 7) Разница температуры на выходе из зоны рекуперации достигает 180 °С. Загрузки проходят точку кварцования на выходе из зоны ВТ до зоны низкотемпературной рекуперации (НТ) с низким градиентом температуры 10 °С/ч, что способствует к уменьшению образования трещин кирпичей.

Низкотемпературная рекуперация состоит из 10 простых рядов, которые в свою очередь состоят из 2-х полурампы по 5 стаканов. На выходе из зоны рекуперации НТ вся загрузка охлаждается до температуры ниже 60 °С. За счет наддува подвагонеточного канала воздухопроводами, расположенными с двух сторон при выходе из печи кирпичи охлаждаются до температуры 30 °С.

Можно отметить, что графики типа рис. 4 при разных циклах измерений несколько отличаются, хотя общий характер изменения температуры изделий вдоль канала печи сохраняется. При этом относительное расположение графиков разных термпар также несколько меняются. Это, видимо, связано изменением внешних условий при разных циклах измерений и некоторых других факторов. Для установления влияния различных факторов на тепловое состояние в канале туннельной печи обжига предполагается смоделировать тепло и массообменные процессы по методу, описанному в работах [19, 20].

По анализу показаний приборов определено распределение теплового потребления печи: низшая теплота сгорания топлива – 6201 кВт (74 %); теплота вводимая воздухом – 2060 кВт (25%); теплота вводимая сырым кирпичом – 93 кВт (1%); теплота вводимая вагонами – 13 кВт (~0%). Итого 8365 кВт. Для производства 1 кг кирпичей затрачивается примерно 1670 кДж теплоты сгорания природного газа.

Тепловые потери (расходы): уходящими сухими дымовыми газами – 4490 кВт (54%); на испарение остаточной влаги 320 кВт (4%); на рекуперацию – 1460 кВт (18%); на керамизацию 310 (4%); утечка в подвагонеточное пространство – 930 кВт (11%); утечка через стены печи – 726 кВт (9%); теплота выходящих кирпичей – 81 кВт (~1%); теплота выходящих вагонов – 14 кВт (~0%). Итого 8332 кВт.

#### *Заключение (Conclusions)*

Для улучшения качества кирпичей для большей гибкости контроля условий обжига можно предусмотреть автоматическую регулировку вытяжки, рекупераций ВТ и НТ, температурного наддува и давления печи.

Небольшое количество кирпичей марки 1,4НФ имеют небольшие трещины, без предпочтительного местоположения в загрузке вагона. Этот дефект скорее связан формовкой или сушкой и не связан с обжигом. Для уменьшения данного типа дефекта желательно добиться совместимости разных типов глин в смеси и контролировать кривую сушки в конце процесса.

Второй тип дефекта неравномерность цвета некоторых кирпичей при выходе из печи. Этот дефект, видимо, связан с неравномерностью температуры загрузки верха и низа из-за расположения горелок на своде, и за счет недостаточности сечения каналов между рядами кирпичей на садках для циркуляции продуктов сгорания. При плановой остановки печи на ремонт можно бы расположить несколько рядов баковых горелок перед зоной обжига. Можно часть высокотемпературных продуктов сгорания из конца зоны обжига перенаправить в нижнюю часть зоны подготовки.

#### **Литература**

1. Перегудов В.В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и материалов / В.В. Перегудов, М.И. Роговой. М.; Стройиздат, 1983.- 416 с.
2. Химическая технология керамики Под ред. проф.И.Я. Гузмана.М.: ООО РИФ «Стройматериалы». 2003. – 496 с.
3. Дагаев М.И., Муртазова Х.Т., Авторханов А.М. Система управления процессом обжига кирпича. Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2019. – т. 15. № 3. – С. 5 – 9.

4. Шпегель И.Ф., Ивсанов В.Г. Оптимизация туннельных печей // Научно-технический и производственный журнал. Строительные материалы. 2016. – апрель. С. 52 – 54.
5. Исмаилов М.И., Пиров Ф.С. Умаралиев Р.Ш. Имитационное моделирование технологических процессов термической обработки в среде RDO // Ученые записи Орловского государственного университета. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. науки. 2011, №3.- С. 54 – 60.
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Федосов, СВ. Моделирование тепловых процессов в регенеративных утилизаторах теплоты уходящих газов промышленных печей /С.В. Федосов, В.Е. Мизонов, Н.Н. Елин, С.В. Хавер. // Строительные материалы. 2007.- №9.- С.14 - 16.
8. Жежера Н.И., Сабанчин В.Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объект автоматического управления по разрежению продуктов горения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ».2014.№6.-<http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614
9. Автоматизация процесса обжига керамического кирпича: монография / В.В. Тугов, В.Р. Сабанчин. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 150 с.
10. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine, Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer Science+Business Media, LLC.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Вафин Д.Б. Тепловые и аэродинамические параметры камеры радиации печи пиролиза углеводородов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – т.24. - №3. – С. 198-210.
20. Вафин Д.Б., Ваньков Ю.В. Тепловой расчет камеры радиации печи пиролиза углеводородов с несимметричным расположением настенных горелок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – т.25. - №5. – С. 136-150.

#### Авторы публикации

**Вафин Данил Биаллович** – докт. техн. наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. *Email:* [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Мукатдаров Алик Альбертович** – аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики и

систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). ORCID\*: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email: [alijkjan1155@yandex.ru](mailto:alijkjan1155@yandex.ru)

**Мукатдарова Диана Альбертовна** – магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Email автора. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

### References

1. Peregudov V.V. Thermal processes and installations in the technology of construction products and materials / V.V. Peregudov, M.I. Horny. M.; Stroyizdat, 1983.- 416 p.
2. Khimicheskaya tekhnologiya keramiki / Pod red. prof. I.Ya. Guzman [Chemical ceramic technology. Ed. by I.Ya. Guzman.]. Moscow: OOO RIF «Stroimaterialy». 2003. - 496 p.
3. Dagaev M.I., Murtazova Kh.T., Avtorkhanov A.M. Brick firing process control system. Bulletin of GGNTU. Technical science. – 2019. – vol. 15. No. 3. – P. 5 – 9.
4. Hpegel I.F., Ivsanov V.G. Optimization of tunnel kilns / Scientific, technical and production magazine. Construction Materials. 2016 – April. P. 52 – 54.
5. Ismailov M.I., Pirov F.S. Umaraliev R.Sh. Simulation modeling of technological processes of heat treatment in the RDO environment // Scientific records of Oryol State University. Series: Natural, technical and medical sciences. Sciences . 2011, No. 3.- P. 54 – 60
6. Klekovkin V S , Nikitm Y R, Trefilov S A , Goltsova O B Mathe-matical model of the tunnel kiln for baking bncks//Book of Abstracts - 2006 -№8.
7. Fedosov, SV. Modeling of thermal processes in regenerative heat utilizers of exhaust gases of industrial furnaces / S.V. Fedosov, V.E. Mizonov, N.N. Elin, S.V. Haver. // Construction Materials. 2007.- No. 9.- P. 14 – 16,
8. Zhezhera N.I., Sabanchin V.R. Tunnel kiln for firing ceramic products as an object of automatic control for rarefaction of combustion products // Internet journal "NAUKOVEDENIE". – 2014.-№6. <http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.-DOI: 0.15862/166TVN614.
9. Automation of the firing process of ceramic bricks: monograph / V.V. Tugov, V.R. Sabanchin. – Orenburg: OGU, 2019. – 150 p.
10. . Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4.P. 559-576.
11. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine.,Feb. 2006, P.41-54.
12. Kayashev, A. I. Algorithm of physical quantities fuzzification on the basis of crisp sets / A. I. Kayashev, E. A. Muravyova, A. F. Antipin // CSIT'2007 : proceedings of the international workshop. – Ufa : USATU, 2007. – Vol. 2. – P. 82-83.
13. Vicente H.N., Alessandro P.D. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.. -2009. – v. XXXI. – No. 4.- 297 - P. 297- 304.
14. Aniskin N.A., Nguyen T.C. Temperature Regime and Thermal Stress in a Concrete Massif with Pipe Cooling// Power Technology and Engineering.- 2019. - v.52. No, 6 . - DOI 10.1007/s10749-019-01009-9. 1570-145X 19 5206-0638 © 2019 Springer.
15. Zhuang-nian Li, Mag-sheng Chu, Zheng-gen Liu, Gen-ji Ruan, Bao-feng Li. Furnace heat prediction and control model and its application to large blast furnace // High Temp. Mater, Proc. 2019. 38:884-891.
16. Filipponi M., Rossi F., Presciutti A. and others. Thermal Analysis of an Industrial Furnace // Preprints (www.preprints.org) Posted: 3 August 2016. doi:10.20944/preprints201608.0029.v1.
17. Cheremiskina N., Loshkarev N., Lavrov V., Spirin N. Study of thermal performance of modern design of the drum-type batch furnace // in VII All- Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists on “Heat Engineering and Computer Science in Education, Science and Production”, KnE Engineering, pages 138–143. DOI 10.18502/keg.v3i5.2662.
18. Yitong Xie, Chaokui Qin, Shuangqian Cuo, Zhicuang Chen. Experimental reserch of a small-scale industrial furnace with regenerative disc-flame burners // Thermalprocessing.com. 2024. – P/ 33-40
19. Vafin D.B. Thermal and aerodynamic parameters of the radiation chamber of the hydrocarbon pyrolysis furnace // News of higher educational institutions. Energy problems. –

2022. – v.24. - No. 3. – pp. 198-210.

20. Vafin D.B., Vankov Yu.V. Thermal calculation of the radiation chamber of a hydrocarbon pyrolysis furnace with an asymmetrical arrangement of wall burners // News of Higher Educational Institutions. Energy problems. – 2023. – t.25. - No. 5. – pp. 136-150.

**Authors of the publication**

**Vafin Danil Bilalovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6411-3640>. Author's email: [vafdanil@yandex.ru](mailto:vafdanil@yandex.ru)

**Mukatdarov Alik Albertovich** – Kazan State Power Engineering University. ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-4052-4326>. Email. [alikjan1155@yandex.ru](mailto:alikjan1155@yandex.ru)

**Mukatdarova Diana Albertovna** – Kazan State Power Engineering University. Email. [Di\\_mukatdarovaaa@mail.ru](mailto:Di_mukatdarovaaa@mail.ru)

*Шифр научной специальности по паспорту научной специальности: 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» или 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».*

**Получено**

**Отредактировано**

**Принято**