УДК 620.9

Нуржигит К.К.

магистрант

кафедра «Инженерные системы и сети»

Казахский национальный исследовательский технический университет

им. К.И. Сатпаева

(г. Алматы, Казахстан)

Бегимбетова А.С.

PhD, ассоциированный профессор,

кафедра «Безопасность труда и инженерная экология»

Алматинский университет энергетики и связи им. Г. Даукеева

(г. Алматы, Казахстан)

МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОГО ТЕПЛА И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ: ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Аннотация: *производство керамики относится к числу наиболее энергоемких отраслей промышленности вследствие необходимости ведения высокотемпературных технологических процессов. В обжиговых печах более 50% энергии топлива теряется в виде тепловых отходов с дымовыми газами и воздухом зоны охлаждения, что приводит к тепловому загрязнению окружающей среды. В связи с этим в данной статье представлен систематический обзор методов утилизации сбросного тепла (WHR) керамических печей и повышения энергоэффективности предприятий. Проведен сравнительный анализ эффективности и технических ограничений таких современных технологий, как рекуперативные горелки, теплообменники на базе тепловых труб (HPHE) и органический цикл Ренкина (ORC). Результаты анализа показывают, что направление чистого горячего воздуха из зоны охлаждения в сушильные установки позволяет снизить расход природного газа на 15–30%. Кроме того, рассмотрены проблемы коррозии оборудования и обоснована необходимость внедрения высокотемпературных тепловых аккумуляторов (TES) и новых*

материалов на основе карбида кремния в качестве перспективных направлений дальнейших исследований.

Ключевые слова: *керамическая печь, утилизация сбросного тепла, энергоэффективность, рекуперативная горелка, тепловая труба, органический цикл Ренкина, экономия природного газа, тепловой аккумулятор, карбид кремния.*

Введение. Современные тенденции развития промышленного сектора неразрывно связаны с рациональным использованием энергетических ресурсов и снижением объемов вредных выбросов в окружающую среду. Среди отраслей тяжелой промышленности особое место занимает производство керамических изделий (строительного кирпича, облицовочной плитки, огнеупорных материалов). Технологический цикл керамического производства требует высокотемпературной термической обработки (от 900 °C до 1400 °C), что обусловливает потребление значительных объемов органического топлива, преимущественно природного газа [3, с. 14].

Согласно статистическим данным, от 60% до 70% всей энергии, потребляемой на кирпичных и керамических заводах, приходится на непрерывно действующие туннельные или роликовые печи обжига [6, с. 88]. Однако более половины этой энергии не расходуется на полезную работу, а выбрасывается в атмосферу вместе с отходящими дымовыми газами из дымовой трубы и горячим воздухом из зоны охлаждения готовой продукции. Данное явление не только увеличивает экономические издержки предприятий, но и способствует тепловому загрязнению и росту выбросов парниковых газов. В этой связи исследование методов экономии тепловой и электрической энергии путем внедрения систем рекуперации сбросного тепла (Waste Heat Recovery — WHR) обжиговых печей является актуальной научно-инженерной задачей.

Материалы и методы исследования. В данной работе с целью выявления современных методов повышения энергоэффективности в керамической промышленности применен метод систематического обзора научной литературы. В ходе исследования были отобраны научные статьи и

технические отчеты, опубликованные за последние 5–7 лет в международных базах данных Scopus, Web of Science и Google Scholar. При поиске использовались комбинации таких ключевых слов, как «ceramic kiln», «waste heat recovery», «energy efficiency», «Organic Rankine Cycle». Из более чем 30 отобранных научных публикаций был проведен критический анализ наиболее значимых исследований, непосредственно касающихся конструктивных особенностей керамических печей, а также технологий внутренней и внешней утилизации сбросного тепла.

Тепловой баланс и тепловые потери в керамических печах. Прежде чем перейти к обзору технологий, необходимо рассмотреть распределение тепловых потоков в керамических туннельных печах. Исследования теплового баланса печных агрегатов показывают, что лишь 30–35% теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, непосредственно затрачивается на физико-химические превращения материала (спекание керамики) [1, с. 412]. Оставшаяся часть энергии формирует следующие статьи тепловых потерь:

Исследования энергетического и эксергетического балансов печных агрегатов показывают, что лишь 30–35% теплоты, выделяющейся при сгорании природного газа, непосредственно затрачивается на эндотермические физико-химические превращения минерального сырья и формирование керамического черепка [1, с. 412]. Оставшиеся 65–70% подведенной энергии формируют вторичные тепловые потоки и необратимые потери, структура которых представлена следующими основными статьями:

Теплота, уносимая с дымовыми газами (25–35%): температура газов, выходящих из зоны обжига печи, достигает 200–450 °C. В составе этих газов присутствуют взвешенные частицы пыли и химически агрессивные соединения.

Теплота, отводимая с воздухом зоны охлаждения (15–25%): для охлаждения обожженных керамических изделий перед выгрузкой в печь подается холодный воздух. В процессе охлаждения продукции воздух нагревается до 150–300 °C. Данный поток является чистым, однако при отсутствии систем утилизации он выбрасывается непосредственно в атмосферу.

Потери теплоты в окружающую среду через ограждающие конструкции — боковые стены, свод печи и под печных вагонеток (5–10%), а также потери теплоты на нагрев самих печных вагонеток и огнеупорной оснастки (футеровки подов, капселей, роликов), которые в старых туннельных печах с массивными вагонетками могут дополнительно достигать 8–12% [6, с. 94].

Методы утилизации сбросного тепла для внутренних технологических нужд. Внутренняя утилизация представляет собой метод прямой экономии природного газа за счет возврата отводимой от печи теплоты обратно в производственный цикл предприятия.

Система рекуперативных горелок. В традиционных печных системах воздух, подаваемый на горение, имеет температуру окружающей среды. Как показывают исследования, предварительный подогрев дутьевого воздуха до 300 °С за счет утилизации теплоты дымовых газов позволяет снизить удельный расход топлива на 12–15% [8, с. 55].

Теплообменники на базе тепловых труб (HPHE). Высокую эффективность в керамической отрасли в настоящее время демонстрируют теплообменные аппараты на основе тепловых труб (Heat Pipes). Поскольку данные устройства функционируют по принципу фазового перехода (испарение и конденсация промежуточного теплоносителя), они обладают сверхвысокой эффективной теплопроводностью. Транспортировка горячего воздуха из зоны охлаждения в сушильные камеры посредством тепловых труб позволила предприятиям по выпуску керамических изделий сократить потребление природного газа на величину до 25% [5, с. 102].

Внешняя утилизация сбросного тепла и генерация электроэнергии. В случаях, когда внутренние тепловые потребности завода полностью обеспечены, избыточную тепловую энергию целесообразно направлять на внешние нужды, в частности на выработку электрической энергии.

Органический цикл Ренкина (ORC). Наиболее оптимальным техническим решением для генерации электроэнергии на базе низко- и среднетемпературных (150–400 °С) дымовых газов керамических печей является технология

органического цикла Ренкина (ORC). Используя вместо водяного пара низкокипящие органические рабочие тела (например, бутан, пентан или современные хладагенты), данные установки преобразуют тепловую энергию отходящих газов в механическую работу турбины, а затем — в электрическую энергию [4, с. 74]. Согласно результатам исследований, внедрение установки ORC на керамическом заводе средней мощности позволяет снизить зависимость предприятия от внешних электрических сетей на 18–22%.

Для систематизации результатов проведенного анализа современных исследований была составлена сравнительная характеристика рассмотренных технологий (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительная характеристика технологий утилизации сбросного тепла для керамических печей.

Название технологии	**Источник тепла и его температура**	**Полезный эффект**	**Основные преимущества**	**Технические ограничения**	**Источник**
Рекуператоры	Дымовые газы (250–400 °C)	Экономия газа на 12–15%	Простота конструкции	Высокий риск коррозии и сажеобразования	[8, с. 57]
Тепловые трубы (HPHE)	Воздух охлаждения (150–250 °C)	Обеспечение сушилок горячим воздухом	Очень высокая плотность теплового потока	Рост давления при высоких температурах	[5, с. 105]
Органический цикл Ренкина (ORC)	Дымовые газы (>300°C)	Выработка собственной электроэнергии (до 20%)	Снижение зависимости от внешней электросети	Высокие капитальные затраты (CAPEX)	[4, с. 78]

Результаты и обсуждение. Анализ рассмотренных научных трудов подтверждает значительный потенциал утилизации сбросного тепла в керамической промышленности. Однако при практическом внедрении

современных систем рекуперации необходимо учитывать ряд критически важных научных и инженерных ограничений.

Во-первых, в составе дымовых газов керамических печей содержатся соединения фтора, серы и высокодисперсная кислотная пыль. При снижении температуры дымовых газов ниже «точки росы» на теплообменных поверхностях традиционных металлических аппаратов начинается интенсивная кислотная коррозия, что резко сокращает срок службы оборудования [3, с. 38]. Для решения данной проблемы, как показал проведенный обзор, необходимо развивать направление по применению инновационных конструкционных материалов — в частности, карбида кремния (SiC) или специальных коррозионностойких керамических покрытий.

Во-вторых, нестационарность производственного цикла (остановки печи, колебания производственной нагрузки) приводит к нестабильности параметров выделяемых тепловых потоков. Эффективным способом нивелирования данного фактора является интеграция систем утилизации сбросного тепла с высокотемпературными тепловыми аккумуляторами (TES) на основе материалов с фазовым переходом. Аккумулирование избыточного тепла воздуха зоны охлаждения с последующей стабильной подачей в сушильное отделение в периоды остановок печи или в холодное время года существенно повышает надежность и энергоэффективность всей технологической линии.

Заключение. Утилизация сбросного тепла обжиговых печей является наиболее эффективным стратегическим направлением повышения энергоэффективности предприятий керамической промышленности. Проведенный систематический обзор показал, что направление чистого горячего воздуха из зоны охлаждения в сушильные агрегаты посредством внутренней рециркуляции, а также применение рекуперативных горелок позволяют снизить расход природного газа на заводе в среднем на 15–30%. В свою очередь, внешняя утилизация потенциала высокотемпературных дымовых газов на базе технологии органического цикла Ренкина (ORC) способна обеспечить

предприятие значительной долей собственной электрической энергии. Дальнейшие научные исследования целесообразно направить на разработку новых коррозионностойких композиционных материалов для теплообменников и проектирование аккумуляторных систем для стабилизации нестационарных тепловых потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Arı M., Karakoç H. Thermal analysis and waste heat recovery potential in ceramic tunnel kilns // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 178. P. 410–422
2. Delpech B., Axcell S. Energy efficiency and reduction of carbon emissions in ceramic kilns using advanced thermal recovery systems // Thermal Science and Engineering Progress. 2024. Vol. 41. P. 115–128
3. Измаилов А.А. Энергетический аудит и оптимизация тепловых процессов в промышленности строительных материалов. М.: Стройиздат, 2019. 245 с.
4. Peris J., Navarro R. Organic Rankine Cycle (ORC) for electricity generation from ceramic industry waste heat // Energy Conversion and Management. 2021. Vol. 230. P. 71–82
5. Silvat R., Souza M. Application of heat pipe heat exchangers for heat recovery from ceramic baking kilns // Energy. 2022. Vol. 244. P. 101–112
6. Смирнов В.А., Сидоров И.П. Теплотехника и энергосбережение в производстве керамики. СПб.: Профессия, 2021. 188 с.
7. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud N. Waste heat recovery technologies and applications in the ceramic sector: A review // Energy. 2023. Vol. 263. P. 125–139
8. Zanoli A., Marani F. Energy efficiency enhancement in ceramic industry through regenerative burners // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38, no. 4. P. 53–62

Nurzhigit K.K.
master's degree student
Department of Engineering Systems and Networks
Satbayev University
(Almaty, Kazakhstan)

Begimbetova A.S.
PhD, Associate Professor, Senior Lecturer
Department of Occupational Safety and Environmental Engineering
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeyev
(Almaty, Kazakhstan)

METHODS OF WASTE HEAT RECOVERY AND IMPROVING CERAMIC KILN ENERGY EFFICIENCY: A REVIEW OF CURRENT TECHNOLOGICAL SOLUTIONS

Abstract: *ceramic production is among the most energy-intensive industries because it requires high-temperature processes. In firing kilns, more than 50% of fuel energy is lost as waste heat carried by flue gases and cooling-zone air, contributing to thermal pollution. This article therefore presents a systematic review of ceramic kiln waste heat recovery (WHR) methods and measures to improve energy efficiency at ceramic manufacturing facilities. The effectiveness and technical limitations of current technologies, including recuperative burners, heat pipe heat exchangers (HPHEs), and organic Rankine cycle (ORC) systems, are compared. The analysis shows that directing clean hot air from the cooling zone to drying units can reduce natural gas consumption by 15–30%. Equipment corrosion is also discussed, and high-temperature thermal energy storage (TES) systems and new silicon carbide-based materials are identified as promising areas for further research.*

Keywords: *ceramic kiln, waste heat recovery, energy efficiency, recuperative burner, heat pipe, organic Rankine cycle, natural gas savings, thermal energy storage, silicon carbide.*