

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№3 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BTOUEn3.2026/2710-3420>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,

д.т.н., профессор

Никифоров А. С.,

д.т.н., профессор

Новожилов А. Н.,

д.т.н., профессор

Алиферов А. И.,

д.т.н., профессор (Российская Федерация)

Кошеков К. Т.,

д.т.н., профессор

Приходько Е. В.,

к.т.н., профессор

Кислов А. П.,

к.т.н., доцент

Нефтисов А. В.,

доктор PhD

Шеръязов С. К.

т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)

Искакова З. С.

технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***Г. А. Айтмагамбетова¹, А. С. Никифоров²**

^{1,2}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7934-9990>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6977-0957>

*e-mail: gul_2904@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОПOTЕРЬ ПЕЧИ ПРОКАЛКИ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА ПРОИЗВОДСТВА ПРОКАЛЕННОГО КОКСА

В статье выполнен системный анализ влияния тепловых потерь печи прокали на энергетическую эффективность комплекса производства прокаленного нефтяного кокса. Исследование основано на сочетании ориентированного графового представления технологической схемы, укрупненного материального и теплового баланса, а также аналитического расчета теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку вращающейся печи.

Показано, что тепловые потери через ограждающие конструкции печи оказывают не только локальное, но и системное влияние на распределение тепловых потоков в последующих узлах комплекса. Для количественной оценки тепловых потерь выполнен аналитический расчет теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку с учетом конвективного и лучистого теплообмена с окружающей средой. На основе параметрического анализа установлено, что перераспределение толщин футеровки и теплоизоляционного слоя при неизменной суммарной толщине 0,392 м приводит к изменению тепловых потерь в диапазоне 0,705–1,297 МВт.

С использованием ориентированного графа обосновано, что снижение тепловых потерь печи повышает температуру отходящих газов, увеличивает тепловую нагрузку котла-утилизатора и способствует росту выработки пара и электрической энергии. Полученные результаты подтверждают системный характер влияния теплового состояния печи прокали на энергоэффективность всего комплекса и определяют направления его оптимизации.

Ключевые слова: прокаленный кокс, печь прокали, тепловые потери, энергоэффективность, тепловой баланс, ориентированный граф.

Введение

Производство прокаленного нефтяного кокса относится к числу наиболее энергоемких процессов углеродной и металлургической промышленности. Высокие температуры прокали, длительное время пребывания материала в печи и значительные объемы теплообмена обуславливают повышенные удельные энергетические затраты. В структуре энергопотребления комплекса основная нагрузка приходится на печь прокали, которая в значительной степени определяет тепловой режим всей технологической схемы.

Вопросы повышения энергетической эффективности высокотемпературных теплотехнологических агрегатов, в том числе вращающихся печей, широко рассматриваются в современной научной литературе. Особое внимание уделяется анализу теплопотерь, механизмам теплообмена и возможностям снижения удельных энергозатрат в энергоемких промышленных процессах.

Значительная доля энергетических потерь во вращающихся печах связана с теплопередачей через ограждающие конструкции и неэффективным использованием подводимой теплоты [1, с. 2042]. Авторы подчеркивают, что мероприятия по снижению теплопотерь печей оказывают прямое влияние на суммарную энергоэффективность промышленных комплексов и могут обеспечивать существенную экономию топлива.

В работе [2, с. 1011] предложены комплексные тепло-технологические модели вращающихся печей, учитывающие взаимосвязь тепловых и гранулярных процессов. Показано, что корректное описание теплообмена между газовой фазой, твердым материалом и стенкой печи позволяет более точно оценивать распределение тепловых потоков и выявлять зоны повышенных теплопотерь, связанные с конструктивными особенностями аппарата.

Значительный вклад в исследование энергоэффективности вращающихся печей внесли [3, с. 430], предложив метод определения тепловых характеристик печи на основе температуры наружной поверхности корпуса. В этих исследованиях показано, что для определения температуры наружной поверхности целесообразно сочетать экспериментальные данные с аналитическими и численными моделями теплопередачи. Сочетание аналитических уравнений теплопроводности и численного моделирования

позволяет определить коэффициенты теплообмена и количественно оценить теплопотери через стенку печи.

В работе [4, с. 131] выполнен детальный анализ конвективного теплообмена в барабанных аппаратах, показавший существенное влияние режимов движения газа и материала на тепловой баланс печи. Аналогичные выводы получены в исследованиях, посвященных численному моделированию тепловых и массообменных процессов во вращающихся барабанах [5, с. 1].

Влияние лучистого теплообмена и его вклад в общий тепловой поток во вращающихся печах рассмотрены в работе [6, с. 100], где показано, что при высоких температурах доля лучистого теплообмена становится сопоставимой с конвективной составляющей. Кроме того, авторы [7, с. 517] исследовали возможности утилизации тепла через наружную поверхность корпуса вращающихся печей, подтвердив значительный потенциал снижения теплопотерь за счет конструктивных и режимных мероприятий.

Несмотря на значительное количество исследований, большинство работ рассматривает вращающую печь как отдельный аппарат без учета ее взаимодействия с последующими узлами утилизации тепла. Поэтому актуальным является комплексный подход, позволяющий оценить влияние теплопотерь печи на энергетические показатели всего технологического комплекса.

Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке влияния теплопотерь печи прокалики на энергетическую эффективность комплекса производства прокаленного кокса. В отличие от локального рассмотрения тепловых потерь печи, в работе оценено их влияние на последующие технологические узлы, включая котел-утилизатор и паротурбинную установку.

Для анализа взаимосвязи между технологическими узлами использовано представление комплекса в виде ориентированного графа. На его основе выполнены укрупненные материальный и тепловой балансы, а теплопотери печи определены аналитическим расчетом теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку. Результаты аналитического расчета проверены с помощью численного моделирования в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Дополнительно проведен параметрический анализ влияния соотношения толщин футеровки и теплоизоляции при постоянной суммарной толщине стенки 0,392 м. Установлено, что увеличение толщины теплоизоляции приводит к снижению теплопотерь, однако сопровождается уменьшением толщины футеровки, что необходимо учитывать при выборе конструкции стенки печи.

Материалы и методы

Методологическая основа

Методологическая основа исследования включает три взаимосвязанных этапа [3, с. 432]: структурный анализ комплекса с использованием ориентированного графа, укрупненный материальный и тепловой баланс узлов и расчет теплопередачи через стенку печи прокалки. Ориентированный граф позволяет проследить направление движения материальных и энергетических потоков и оценить влияние печи прокалки на последующие узлы утилизации тепла. Укрупненные балансы позволяют количественно оценить основные потоки энергии и тепловые потери. Расчет теплопередачи через ограждающие конструкции используется для определения теплотерь печи.

Структурное представление комплекса

В упрощенном виде структура комплекса прокалки нефтяного кокса может быть представлена в виде последовательности взаимосвязанных технологических узлов: печь прокалки, печь дожига летучих веществ, котел-утилизатор, паротурбинная установка и конденсационно-деаэрационный контур с обратными тепловыми связями от холодильника прокаленного кокса [8, с. 6].

Такое представление позволяет одновременно учитывать прямые и возвратные материальные и тепловые потоки, формирующие замкнутую теплотехнологическую систему (рисунок 1).

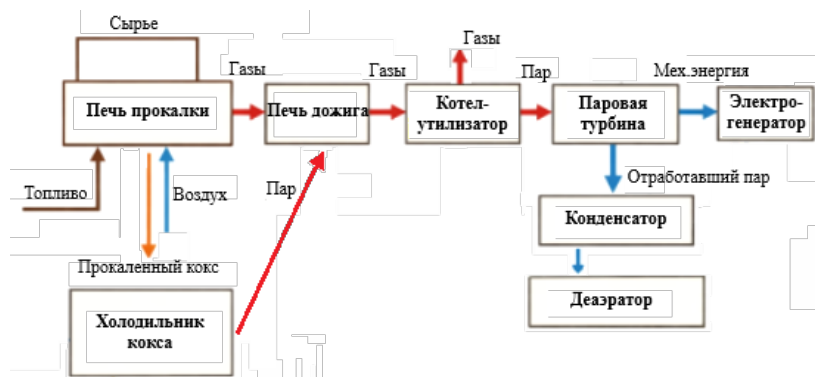


Рисунок 1 – Схема ориентированного графа материальных и тепловых потоков комплекса производства прокаленного кокса

Использование ориентированного графа позволяет перейти от качественного описания технологической схемы к количественному

анализу тепловых потоков и теплопотерь отдельных узлов, в том числе печи прокалки.

Печь прокалки является центральным теплотехнологическим узлом комплекса производства прокаленного нефтяного кокса и в значительной степени определяет характер формирования основных материальных и тепловых потоков всей системы. В печи осуществляется высокотемпературная обработка сырого кокса, сопровождающаяся удалением влаги и летучих веществ, структурной перестройкой материала и накоплением внутренней энергии в прокаленном продукте.

Материальный баланс печи прокалки основан на законе сохранения массы и включает учет потоков сырого кокса, топлива, воздуха для горения, прокаленного кокса и отходящих газов. Согласно расчетным данным, масса прокаленного кокса составляет в среднем 86-89 % от массы исходного сырья, а остальная часть удаляется в виде летучих компонентов и газообразных продуктов сгорания.

Тепловой баланс печи прокалки формируется за счет теплоты сгорания топлива, частичного окисления летучих веществ кокса и теплового содержания входящих потоков. Основные статьи расхода теплоты связаны с нагревом и термической обработкой кокса, нагревом отходящих газов, а также с теплопотерями через футеровку и конструктивные элементы печи. Расчет показывает, что теплопотери через ограждающие поверхности (6-10 %) составляют заметную часть подводимой тепловой мощности и оказывают влияние на энергетические показатели печи и всего комплекса.

Результаты и обсуждение

Аналитический расчет теплопотерь через стенку печи прокалки

Для количественной оценки теплопотерь через ограждающие конструкции печи прокалки выполнен аналитический расчет теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку вращающейся печи в стационарном режиме. Печь прокалки состоит из металлического корпуса, футерованного внутри огнеупорным и теплоизоляционным материалом. Методика расчета основана на подходе, применяемом при анализе тепловых процессов во вращающихся печах [3, с. 431], где теплопередача описывается через совокупность процессов теплопроводности, конвекции и излучения.

Ранее разработанная модель комплекса в виде ориентированного графа позволила перейти от локального анализа печи прокалки к системной оценке её влияния на энергетические показатели всего производства. В рамках графовой структуры каждая вершина соответствует отдельному узлу технологической схемы, а рёбра отражают направленные материальные и тепловые потоки между ними.

Такое представление обеспечивает возможность проследить распространение изменения энергетического состояния печи прокалки по всей цепочке преобразований энергии: от формирования газового потока после прокалки до работы печи дожига, котла-утилизатора и паротурбинного контура.

Расчет ориентированного графа показал, что увеличение тепловых потерь через ограждающие конструкции печи приводит к снижению энергетического потенциала отходящих газов, уменьшению доступной теплоты в котле-утилизаторе и, как следствие, к снижению паропроизводительности и электрической мощности комплекса.

Таким образом, снижение теплотерь печи позволяет сохранить больше теплоты в отходящих газах и повысить эффективность ее последующей утилизации в котле-утилизаторе и паротурбинной установке.

Исходные данные, расчетная схема и основные допущения

Исходные данные для аналитического и численного моделирования сформированы на основе геометрических и теплотехнических характеристик рассматриваемой печи прокалки, а также принятых расчетных параметров теплообмена. Геометрические размеры печи, толщина конструктивных слоев и их коэффициенты теплопроводности использованы как исходные параметры расчетной модели. Геометрические характеристики печи получены по технической документации промышленного агрегата. Температурные условия и коэффициенты теплоотдачи приняты в соответствии с расчетной постановкой задачи. Для обеспечения сопоставимости результатов аналитического и численного расчетов одинаковые геометрические и теплофизические параметры использованы в обеих моделях.

В расчете приняты следующие допущения [9, с. 15]:

- процесс теплопередачи является стационарным;
- температурное поле вдоль длины печи усредняется;
- теплообмен внутри печи описывается эквивалентным коэффициентом теплоотдачи h_{in} ;
- теплообмен с окружающей средой учитывает конвекцию и лучистый теплообмен.
- температура газовой среды в зоне прокалки принята $T_g = 1400$ °C, температура окружающей среды = 20 °C.
- длина печи составляет $L = 65$ м.
- внутренний коэффициент теплоотдачи принят $h_{in} = 30$ Вт/м²К,
- наружный коэффициент конвективной теплоотдачи $h_{out} = 10$ Вт/м²К.
- коэффициент излучения поверхности корпуса принят $\varepsilon = 0,8$.

Геометрические и теплофизические параметры слоев стенки:

- внутренний диаметр печи – 2930 мм;
- наружная граница огнеупорной футеровки – 3470 мм;
- наружный диаметр теплоизоляционного слоя – 3714 мм;
- наружный диаметр печи – 3930 мм.
- толщина футеровки $\delta_{\text{ref}} = 0,27$ м, $\lambda_{\text{ref}} = 1,5$ Вт/мК;
- толщина теплоизоляции $\delta_{\text{ins}} = 0,122$ м, $\lambda_{\text{ins}} = 0,25$ Вт/мК;
- толщина металлического корпуса $\delta_{\text{st}} = 0,108$ м, $\lambda_{\text{st}} = 45$ Вт/мК.

Принятые допущения определяют область применимости разработанной модели. Расчет предназначен для оценки стационарных тепловых потерь через ограждающие конструкции вращающейся печи при заданной средней температуре рабочей зоны и постоянных теплофизических свойствах материалов. Модель не учитывает продольное распределение температуры по длине печи, локальные температурные неоднородности, изменение теплофизических свойств материалов с температурой, влияние вращения на локальный теплообмен и нестационарные режимы работы. Поэтому полученные результаты применимы прежде всего для сравнительного параметрического анализа вариантов конструкции стенки и оценки влияния перераспределения толщин футеровки и теплоизоляции на суммарные теплотери.

Основные параметры расчетной модели выбраны так, чтобы они соответствовали реальным условиям работы печи прокалики. Температура газовой среды определяет количество теплоты, которое передается внутренней поверхности печи. Коэффициент внутренней теплоотдачи показывает интенсивность передачи теплоты от горячих газов к футеровке. Наружный коэффициент теплоотдачи и степень черноты поверхности учитывают теплообмен с окружающей средой. Геометрические размеры футеровки, теплоизоляции и металлического корпуса приняты в соответствии с конструкцией исследуемой печи.

Теплопроводность многослойной цилиндрической стенки

Суммарное термическое сопротивление теплопроводности многослойной стенки определяется выражением:

$$R_{\text{cond}} = \sum_i \frac{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_i} \quad (1)$$

где r_i и r_{i+1} – внутренний и внешний радиусы соответствующего слоя, λ_i – коэффициент теплопроводности материала слоя.

Теплообмен на границах стенки

Сопротивление внутреннего теплообмена между газовой средой и футеровкой определяется как:

$$R_{in} = \frac{1}{h_{in} \cdot A_{in}}, A_{in} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_1 \quad (2)$$

Теплоотдача с наружной поверхности корпуса учитывает конвективный и лучистый теплообмен. Эквивалентный коэффициент лучистого теплообмена определяется по выражению:

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_B^2 + T_\infty^2) \cdot (T_B + T_\infty) \quad (3)$$

где T_B – температура наружной поверхности корпуса,
 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²К⁴.

Сопротивление наружного теплообмена:

$$R_{out} = \frac{1}{(h_{out} + h_{rad}) \cdot A_{out}}, A_{out} = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot r_4 \quad (4)$$

Определение теплотерьер

Тепловой поток теплотерьер через стенку печи определяется из уравнения стационарного теплового баланса:

$$Q_{loss} = \frac{T_g + T_\infty}{R_{in} + R_{cond} + R_{out}} \quad (5)$$

Температура наружной поверхности корпуса определяется итерационным способом из условия равенства теплового потока, проходящего через стенку и теплового потока, отводимого в окружающую среду [10, с. 42].

Результаты расчёта

С целью анализа влияния перераспределения толщин между футеровкой и теплоизоляцией расчёты выполнены при условии постоянства суммарной толщины 0,392 м. При этом изменение толщины теплоизоляционного слоя осуществлялось за счёт соответствующего уменьшения толщины футеровки и наоборот. Толщина металлического корпуса оставалась неизменной.

Теплопередача через стенку печи рассматривалась в стационарной постановке и включала:

- теплопроводность через многослойную цилиндрическую стенку;
- конвективный теплообмен между рабочей зоной печи и футеровкой;

– конвективный и лучистый теплообмен между наружной поверхностью корпуса и окружающей средой.

Результаты расчёта температуры наружной поверхности корпуса и суммарных теплотерь печи проковки при различном соотношении толщин футеровки и теплоизоляции приведены в таблице 1.

Численное решение теплопередачи в печи проковки

Для проверки результатов аналитического расчета выполнено численное моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Расчет проведен в стационарной постановке с использованием физического интерфейса Heat Transfer in Solids. В численной модели сохранены те же геометрические размеры, толщины слоев и свойства материалов, что и в аналитическом расчете. Результаты сравнивались по температуре наружной поверхности корпуса и общим теплотерям печи.

На рисунке 2 представлены граничные условия теплообмена, принятые в модели.

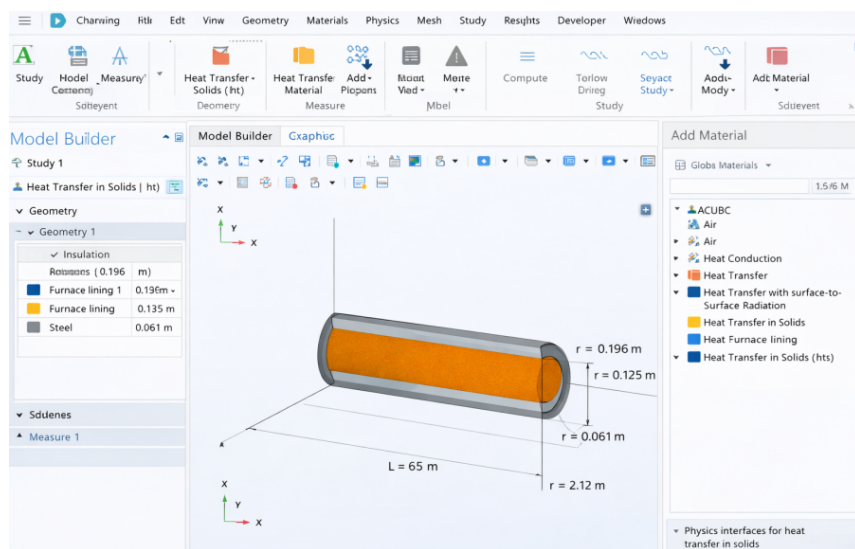


Рисунок 2 – Задание граничных условий теплообмена в модели печи проковки

Геометрическая модель печи представлена в виде осесимметричного цилиндра, включающего слои футеровки, теплоизоляции и металлического корпуса. Геометрические размеры и теплофизические свойства

материалов соответствуют значениям, принятым в аналитическом расчете. Внутренняя поверхность футеровки задана при постоянной температуре, соответствующей температуре газовой среды в зоне прокалки, а на наружной поверхности корпуса учтен теплообмен с окружающей средой за счет конвекции и излучения.

Сопоставление аналитических и численных результатов

Для оценки влияния перераспределения толщин ограждающих слоев на уровень теплотерь печь прокалки рассмотрена как многослойная цилиндрическая стенка, включающая футеровку, теплоизоляцию и металлический корпус. При этом изменение толщины одного слоя компенсируется соответствующим изменением толщины другого. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение аналитических и численных оценок теплотерь печи прокалки

Толщина теплоизоляции, м	Толщина футеровки, м	Температура по формулам, °С	Теплопотери МВт (анал.)	Температура корпуса (COM-SOL)	Теплопотери МВт (COM-SOL)	Погрешность теплотерь МВт
0,122	0,27	102,6	1,297	113,0	1,286	0,011
0,15	0,242	96,0	1,151	104,1	1,144	0,007
0,2	0,192	86,0	0,955	91,7	0,951	0,004
0,25	0,142	78,1	0,813	82,2	0,81	0,003
0,3	0,092	71,7	0,705	74,7	0,703	0,002

Анализ данных таблицы 1 показывает выраженную зависимость теплотерь печи от соотношения толщин футеровки и теплоизоляции при неизменной суммарной толщине ограждающей конструкции. При увеличении толщины теплоизоляции с 0,122 до 0,3 м теплотери печи последовательно снижаются. Одновременно уменьшается температура наружной поверхности корпуса. Наибольшее снижение теплотерь получено для варианта с толщиной теплоизоляции 0,3 м.

Вместе с тем полученная зависимость не означает, что максимальная рассмотренная толщина теплоизоляции является оптимальной для промышленной эксплуатации. При увеличении толщины теплоизоляции до 0,3 м толщина огнеупорной футеровки уменьшается до 0,092 м, что может ограничивать возможность практической реализации такого варианта с учетом требований к механической прочности, термостойкости

и долговечности футеровки. Поэтому результаты таблицы 1 следует рассматривать как оценку теплотехнического потенциала перераспределения слоев, а не как непосредственную рекомендацию по изменению конструкции печи. Практический выбор толщины теплоизоляции должен выполняться с учетом минимально допустимой толщины футеровки, условий эксплуатации и экономической целесообразности.

В целом результаты подтверждают, что перераспределение толщин слоев при неизменной общей толщине стенки оказывает существенное влияние на энергетические показатели печи и может рассматриваться как одно из направлений повышения энергоэффективности комплекса производства прокаленного кокса.

Выводы

Выполненный аналитический и численный анализ показал, что перераспределение толщин футеровки и теплоизоляции при постоянной суммарной толщине ограждающей конструкции 0,392 м оказывает существенное влияние на теплотери печи прокали. При изменении толщины теплоизоляции от 0,122 до 0,3 м расчетные теплотери снижаются с 1,297 до 0,705 МВт, то есть примерно на 45,6 %.

Численное моделирование в COMSOL Multiphysics подтвердило результаты аналитического расчета. Абсолютная разница между аналитическими и численными значениями теплотерь составила 0,002–0,011 МВт, что соответствует менее 1 % от расчетного теплового потока.

Увеличение толщины теплоизоляции сопровождается снижением температуры наружной поверхности корпуса, что подтверждается как аналитическим расчетом, так и численным моделированием.

Практический выбор конструкции стенки должен выполняться с учетом минимально допустимой толщины футеровки, условий эксплуатации и экономической целесообразности.

Снижение теплотерь печи повышает энергетический потенциал отходящих газов и создает условия для более эффективной утилизации теплоты в последующих узлах комплекса. Дальнейшее повышение энергоэффективности целесообразно рассматривать с учетом не только конструкции стенки печи, но и организации тепловых потоков в системе утилизации отходящих газов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A.** A critical review on energy use and saving in the cement industries [Текст] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 2042–2060. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- 2 **Piton, M., Huchet, F., Le Corre, O., et al.** A coupled thermal–granular model in flights rotary kiln : Industrial validation and process design [Текст] // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 1011–1021.
- 3 **Huchet, F., Le Guen, L.** Energy efficiency of flights rotary kiln [Текст] // Proceedings of the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018). – Berlin, Germany, 2018. – P. 430–435. [Электронный ресурс]. – <https://www.qirt2018.de/portals/qirt18/doc/Tu.4.A.1.pdf>
- 4 **Le Guen, L., Huchet, F., Dumoulin, J.** Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor [Текст] // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 54. – P. 131–139. [Электронный ресурс]. – <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.025>
- 5 **Zhang, K., Muhunthan, B.** Numerical investigation of dry and wet mixing processes of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement [Текст] // Road Materials and Pavement Design. – 2018. – P. 1–15.
- 6 **Le Guen, L., Piton, M., Hénault, Q., et al.** Heat convection and radiation in flighted rotary kiln: A minimal model [Текст] // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 95. – P. 100–110. – <https://doi.org/10.1002/cjce.22659>
- 7 **Huchet, F., Piton, M., Del Barrio, A., et al.** Air-cooling heat exchanger applied to external rotary kiln wall in forced and natural draft [Текст] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 154. – P. 517–525. [Электронный ресурс]. – <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.031>
- 8 **Айтмагамбетова, Г.А., Никифоров, А.С.** Некоторые аспекты оптимизационной задачи энергоэффективной работы комплекса по прокатке кокса [Текст] // Вестник Торайғыров университета, № 3 – 2024. – С. 200.
- 9 **Седнин, В. А.** Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: учебное пособие [Текст] // Минск, БНТУ – 2021. – с. 68
- 10 **Громова, Е.Н.** Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: учебное пособие [Текст] // ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2020. Часть 1. – с.88

REFERENCES

- 1 **Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A.** A critical review on energy use and saving in the cement industries [Text] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – P. 2042–2060. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>
- 2 **Piton, M., Huchet, F., Le Corre, O., et al.** A coupled thermal–granular model in flights rotary kiln: Industrial validation and process design [Text] // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 75. – P. 1011–1021.
- 3 **Huchet, F., Le Guen, L.** Energy efficiency of flights rotary kiln [Text] // Proceedings of the 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018). – Berlin, Germany, 2018. – P. 430 – 435. [Electronic resource]. – <https://www.qirt2018.de/portals/qirt18/doc/Tu.4.A.1.pdf>
- 4 **Le Guen, L., Huchet, F., Dumoulin, J.** Convective heat transfer analysis in aggregates rotary drum reactor [Text] // Applied Thermal Engineering. – 2013. – Vol. 54. – P. 131–139. [Electronic resource]. – <https://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.01.025>
- 5 **Zhang, K., Muhunthan, B.** Numerical investigation of dry and wet mixing processes of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement [Text] // Road Materials and Pavement Design. – 2018. – P. 1–15.
- 6 **Le Guen, L., Piton, M., Hénault, Q., et al.** Heat convection and radiation in flighted rotary kiln: A minimal model [Text] // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 95. – P. 100–110. – <https://doi.org/10.1002/cjce.22659>
- 7 **Huchet, F., Piton, M., Del Barrio, A., et al.** Air-cooling heat exchanger applied to external rotary kiln wall in forced and natural draft [Text] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 154. – P. 517–525. [Electronic resource]. – <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.031>
- 8 **Aitmagambetova, G. A., Nikiforov, A. S.** Nekotorye aspekty optimizatsionnoj zadachi energoeffektivnoj raboty kompleksa po prokalke koksa [Some aspects of the optimization problem of energy-efficient operation of a coke calcining complex] [Text] // Bulletin of Toraighyrov University. – 2024. – No. 3. – P. 200.
- 9 **Sednin, V. A.** Modelirovanie, optimizatsiya i upravlenie teplotekhnicheskimi sistemami [Modeling, optimization and control of thermal engineering systems] [Text] // Study guide. – Minsk : Belarusian National Technical University (BNTU), 2021. – 68 p.
- 10 **Gromova, E. N.** Vysokotemperaturnye teplotekhnologicheskie processy i ustanovki [High-temperature thermal engineering processes and installations] [Text] //

Study guide. – St. Petersburg : Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2020. – Part 1. – 88 p.

Поступило в редакцию 03.04.26.

Поступило с исправлениями 24.04.26.

Принято в печать 31.08.26.

*Г. А. Айтмагамбетова¹, А. С. Никифоров²

^{1,2}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

03.04.26 ж. баспаға түсті.

24.04.26 ж. түзетулерімен түсті.

31.08.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОКСТЫ КҮЙДІРУ ӨНДІРІСІ КЕШЕНІНІҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІНЕ КҮЙДІРГІШ ПЕШТІҢ ЖЫЛУ ШЫҒЫНДАРЫНЫҢ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

Бұл мақалада күйдіргіш пештің жылу шығынының күйдіргіш мұнай коксын өндіру қондырғысының энергия тиімділігіне әсерін жүйелік талдау ұсынылған. Зерттеу технологиялық ағын диаграммасының бағдарланған графикалық көрінісіне, біріктірілген материал мен жылу балансына және айналмалы пештің көп қабатты цилиндрлік қабырғасы арқылы жылу берудің аналитикалық есептеуіне негізделген.

Пешті қоршап тұрған құрылымдар арқылы жылу шығыны қондырғының кейінгі бөлімшелеріндегі жылу ағындарының таралуына жергілікті ғана емес, сонымен қатар жүйелік әсер ететіні көрсетілген. Жылу шығынын сандық бағалау үшін қоршаған ортамен конвективті және сәулелік жылу алмасуды ескере отырып, көп қабатты цилиндрлік қабырғаның жылу өткізгіштігінің аналитикалық есебі жүргізілді. Параметрлік талдау негізінде, жалпы қалыңдығы 0,392 м тұрақты болатын қаптама мен жылу оқшаулағыш қабаттың қалыңдығын қайта бөлу жылу шығынының 0,705–1,297 МВт диапазонында өзгеруіне әкелетіні анықталды. Бағытталған графикті қолдана отырып, пештің жылу шығынын азайту пайдаланылған газ температурасын арттыратыны, қалдық жылу қазандығының жылу жүктемесін арттыратыны және бу мен электр энергиясын өндірудің артуына ықпал ететіні көрсетілді. Нәтижелер кальцинатор пешінің

жылу күйінің бүкіл зауыттың энергия тиімділігіне жүйелік әсерін растайды және оны оңтайландыру бағыттарын анықтайды.

Кілтті сөздер: кальцинирленген кокс, кальцинаатор неші, жылу шығыны, энергия тиімділігі, жылу балансы, бағытталған график.

**G. A. Aitmagambetova¹, A. S. Nikiforov²*

^{1,2}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar.

Received 03.04.26.

Received in revised form 24.04.26.

Accepted for publication 31.08.26.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HEAT LOSSES OF THE CALCINATION FURNACE ON THE ENERGY EFFICIENCY OF A CALCINED COKE PRODUCTION COMPLEX

This article presents a systems analysis of the impact of calcination furnace heat loss on the energy efficiency of a calcined petroleum coke production facility. The study is based on a combination of an oriented graph representation of the process flow diagram, a consolidated material and heat balance, and an analytical calculation of heat transfer through the multilayer cylindrical wall of a rotary kiln.

It is shown that heat loss through the kiln enclosing structures has not only a local but also a systemic impact on the distribution of heat flows in subsequent units of the facility. To quantify heat loss, an analytical calculation of the thermal conductivity of the multilayer cylindrical wall was performed, taking into account convective and radiant heat exchange with the environment. Based on parametric analysis, it was found that redistributing the thicknesses of the lining and thermal insulation layer, with a constant total thickness of 0.392 m, leads to changes in heat loss in the range of 0.705–1.297 MW. Using a directed graph, it was demonstrated that reducing furnace heat loss increases the exhaust gas temperature, increases the heat load of the waste heat boiler, and promotes increased steam and electricity generation. The results confirm the systemic impact of the calciner furnace's thermal state on the energy efficiency of the entire plant and identify areas for its optimization.

Keywords: calcined coke, calciner furnace, heat loss, energy efficiency, heat balance, directed graph.

Теруге 07.09.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

19,0 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4601

Сдано в набор 07.09.2026 г. Подписано в печать 30.09.2026 г.

Электронное издание

19,0 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: Шукитова А. Б.

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4601

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz