

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 669.013

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-395-401

Оригинальная статья
Original article

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ ИЗ МЕЛА

А. С. Сивков , С. И. Чибизова, А. Д. Апасова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

 sivkovsasha777@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена актуальной теме повышения эффективности вращающихся печей, используемых при производстве металлургической извести из мела. Рассмотрены методы совершенствования конструкций и тепловой работы этих агрегатов, что особенно важно в условиях современного производства. Работа начинается с описания значимости извести в металлургической отрасли и особенностей применения вращающихся печей как основных агрегатов для ее производства. Отмечена необходимость повышения производительности и снижения энергозатрат. В статье представлен обзор перспективных технических решений, таких как конструктивные изменения, оптимизация теплообменных устройств, совершенствование горелочных механизмов, внедрение систем автоматического контроля и управления технологическим процессом. Также рассмотрены результаты испытаний, подтверждающих целесообразность использования мела определенных марок. Авторы обращают внимание на важность таких факторов, как качество сырья и квалификация обслуживающего персонала, которые влияют на эффективность обжига. Предложены новые технические решения, позволяющие повышать эффективность процесса обжига и снижать энергозатраты. Изучены основные проблемы, связанные с производством извести из мела. Предлагаемые усовершенствования направлены на решение указанных в работе проблем и улучшение качества конечного продукта. Особое внимание уделено оптимизации теплового режима печи, что позволит более эффективно использовать тепловую энергию и снизить расход топлива, что в свою очередь приведет к снижению себестоимости производства извести. Реализация предложенных технических решений позволит значительно повысить экономическую и экологическую эффективность ее производства. Авторы подчеркивают, что продолжение исследований в данной области перспективно для улучшения эксплуатационных характеристик вращающихся печей и, соответственно, качества получаемого продукта.

Ключевые слова: известь, известняк, мел, подогреватель, вращающаяся печь, обжиг, сталь, ОЭМК, ЛГОК

Для цитирования: Сивков А.С., Чибизова С.И., Апасова А.Д. Направления совершенствования конструкции и тепловой работы вращающейся печи для реализации технологии производства металлургической извести из мела. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):395–401. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-395-401>

IMPROVING THE DESIGN AND THERMAL OPERATION OF A ROTARY KILN FOR PRODUCTION OF METALLURGICAL LIME FROM CHALK

A. S. Sivkov , S. I. Chibizova, A. D. Apasova

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

 sivkovsasha777@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the topical issue of increasing the efficiency of rotary kilns used in the production of metallurgical lime from chalk. Methods of improving the structures and thermal operation of these units are considered, which is especially important in modern production conditions. The work begins with a description of the importance of lime in the metallurgical industry and the specifics of using rotary kilns as the main units for its production. There is a need to increase productivity and reduce energy consumption. The article provides an overview of promising technical

solutions, such as: design changes, optimization of heat exchange devices, improvement of burner mechanisms, introduction of automatic control and process control systems. The results of tests confirming the expediency of using chalk of certain brands are also considered. Attention is drawn to the importance of factors such as the quality of raw materials and the qualifications of service personnel that affect the firing efficiency. The authors proposed new technical solutions to increase the efficiency of roasting process and reduce energy consumption. The article discusses the main problems associated with the production of lime from chalk. The proposed improvements are aimed at solving the mentioned problems and improving the quality of the final product. Special attention is paid to optimizing the thermal mode of the furnace; this will make it possible to use thermal energy more efficiently and reduce fuel consumption, which in turn will lead to reduction in the cost of lime production. Implementation of the proposed technical solutions will significantly increase the economic and environmental efficiency of lime production. The article emphasizes that continued research in this area is promising for improving the performance of rotary furnaces and, consequently, the quality of the resulting product.

Keywords: lime, limestone, chalk, heater, rotary kiln, roasting, steel, Oskol Electrometallurgical Combine (OEMK), Lebedinsky Mining and Processing Combine (LGOK)

For citation: Sivkov A.S., Chibizova S.I., Apasova A.D. Improving the design and thermal operation of a rotary kiln for production of metallurgical lime from chalk. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):395–401. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-395-401>

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире известь является одним из важных материалов, используемых в металлургической отрасли, а вращающаяся печь – одним из наиболее эффективных и распространенных технологических агрегатов для ее получения. Необходимость повышения эффективности работы вращающихся печей, применяемых в технологии производства металлургической извести из мела, является актуальной задачей. Совершенствование конструкции и тепловой работы данных печей позволит увеличить производительность, снизить энергозатраты и улучшить качество получаемого продукта [1; 2].

Приведен обзор наиболее актуальных и перспективных технических решений, реализация которых позволит повысить эффективность работы вращающихся печей для производства металлургической извести из мела, снизить энергопотребление и улучшить экологические показатели технологического процесса [3].

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Вращающаяся печь является одним из наиболее распространенных типов термических агрегатов, применяемых в металлургии, производстве цемента, извести, керамики, огнеупоров и др. [4; 5]. Конструктивные особенности и принцип работы вращающихся печей обуславливают их широкое применение для осуществления таких высокотемпературных процессов, как сушка, обжиг, восстановление, спекание и т. д. Основными преимуществами вращающихся печей перед другими типами термических агрегатов являются:

– непрерывность технологического процесса (материал, загружаемый в верхнюю часть печи, постепенно перемещается вдоль наклонного вращающегося барабана к выгрузочному устройству в нижней части, обеспечивая тем самым непрерывность процесса и возможность регулирования времени пребывания материала в рабочем пространстве);

– интенсивный тепло- и массообмен (вращение барабана печи и лопатки-насадки, установленные на внутренней поверхности, обеспечивают интенсивное перемешивание материала, что способствует эффективному тепло- и массообмену между твердой и газовой фазами);

– возможность использования различных видов топлива (вращающиеся печи могут работать как на твердом, так и на газообразном или жидком топливе, что повышает гибкость производственного процесса);

– относительная простота конструкции и эксплуатации (в сравнении с другими типами термических агрегатов, шахтными и камерными печами вращающиеся печи имеют более простую конструкцию, что облегчает их обслуживание и ремонт);

– высокая производительность (благодаря непрерывности процесса и интенсивному тепло- и массообмену вращающиеся печи способны обеспечивать производительность, достигающую сотен и тысяч тонн в сутки).

Конкретные конструктивные решения и компоновка элементов вращающихся печей определяются спецификой технологического процесса, физико-химическими свойствами перерабатываемого сырья, требованиями к качеству готовой продукции, энергетическими и экологическими факторами. Устройство вращающейся печи приведено на рис. 1 [6; 7].

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗВЕСТИ

Проведенные испытания по производству металлургической извести из мела на лабораторной модели НИТУ «МИСИС» подтвердили возможность и целесообразность применения мела АО «Лебединский горнообогатительный комбинат» на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (обе компании входят в холдинг Металлоинвест) [8].

Вращающаяся печь представляет собой теплообменный аппарат в виде расположенной наклонно вращающейся трубы со встречным движением раскален-

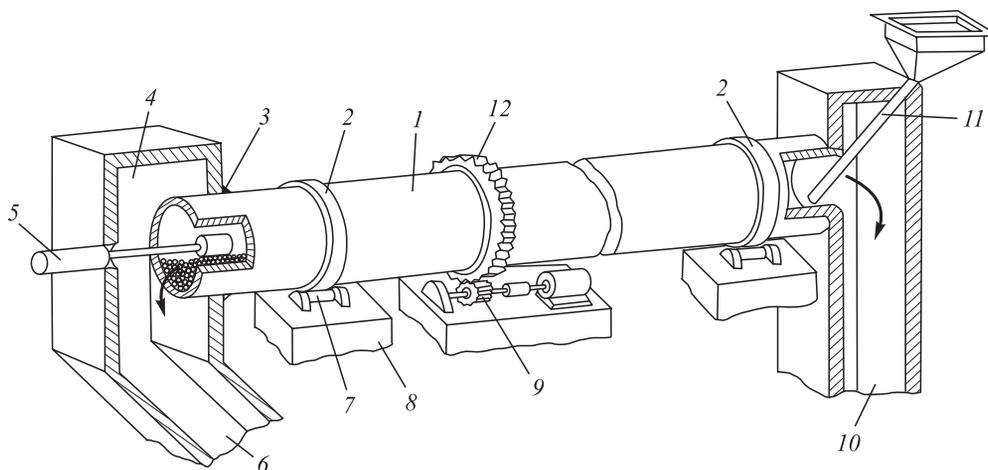


Рис. 1. Устройство вращающейся печи:

1 – барабан; 2 – бандаж; 3 – уплотнение; 4 – топочная камера (горячая головка); 5 – горелка; 6 – разгрузочная тетка; 7 – опорные ролики; 8 – фундамент; 9 – привод барабана; 10 – газоотводная камера; 11 – загрузочное устройство; 12 – венцовая шестерня

Fig. 1. Rotary kiln design:

1 – drum; 2 – bandages; 3 – seal; 4 – kiln chamber (hot head); 5 – burner; 6 – discharge flow; 7 – support rollers; 8 – foundation; 9 – drum drive; 10 – exhaust chamber; 11 – loading device; 12 – ring gear

ных газов и известняка. Размеры кусков загружаемого в печь материала 20 – 60 мм. Номинальная производительность печи составляет 360 т/сут.

Основным элементом вращающейся печи является стальной цилиндрический барабан, диаметром 3,6 м и длиной 75 м. Диаметр этого барабана по всей длине печи одинаков.

Анализ эксплуатационных характеристик существующих конструкций вращающихся печей, используемых в производстве извести, позволяет выделить ряд ключевых направлений их совершенствования, направленных на повышение энергоэффективности, экологичности и экономичности данного технологического процесса. Вопросам повышения эффективности технологических процессов производства извести в обжиговых агрегатах, и в частности во вращающихся печах, посвящен ряд фундаментальных работ.

В монографии А.В. Монастырева «Производство извести» [9] подробно рассмотрены конструктивные особенности и технологические режимы работы различных типов обжиговых печей, в том числе вращающихся. Автором выделены основные факторы, влияющие на эффективность использования топлива при производстве извести: качество и подготовка сырья, конструктивные решения печей, работа вспомогательного оборудования, квалификация обслуживающего персонала. Представлены технические решения по совершенствованию конструкции вращающихся печей, такие как применение внутripечных теплообменных устройств, оптимизация систем загрузки и выгрузки сырья, модернизация горелочных механизмов.

В монографии А.В. Монастырева и Р.Ф. Галиахметова «Печи для производства извести» [10] более детально рассмотрены особенности конструкции и тех-

нологических режимов работы вращающихся печей, влияющие на эффективность использования топлива. Авторами проанализировано влияние таких факторов, как длина и наклон барабана печи, наличие внутripечных теплообменников, режимы загрузки и выгрузки сырьевых материалов.

В патенте РФ 2079785 «Газовая горелка» [11] Л.В. Калашникова и Г.Л. Калашникова предложена конструкция регулируемой газовой горелки, позволяющей управлять параметрами факела и интенсивностью теплообмена в рабочем пространстве печи. Данная разработка способствует повышению эффективности сжигания топлива в обжиговых агрегатах (рис. 2).

В монографии Н.П. Табунщикова «Производство извести» рассмотрены вопросы правильной эксплуатации обжиговых печей, поддержания оптимальных технологических режимов, контроля состава отходящих газов. Отмечается, что данные факторы оказывают существенное влияние на эффективность использования топлива в процессе производства извести.

Одной из основных проблем, ограничивающих эффективность работы вращающихся печей, является неравномерное распределение и движение сырьевого материала внутри барабана печи [12]. Для решения данной проблемы исследуемой печи перспективным направлением является разработка усовершенствованных загрузочных и разгрузочных устройств, обеспечивающих оптимальное распределение и перемещение сырья по длине печи. Ключевым направлением повышения энергетической эффективности вращающихся печей для производства извести является совершенствование систем теплообмена. Рассматриваемая печь отличается значительными потерями теплоты с отходящими газами, а также недостаточным исполь-

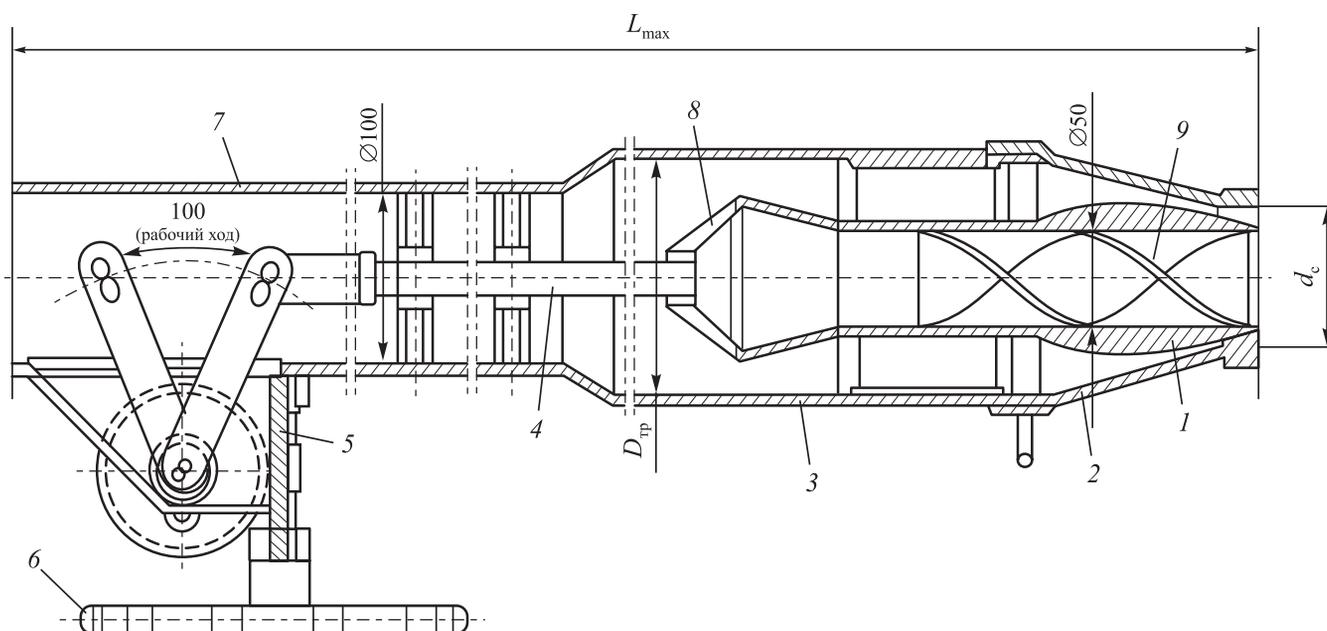


Рис. 2. Горелка одноканальная регулируемая типа ГРЦ (горелки регулируемые цементные) [11]:
 1 – корпус первой ступени горелки; 2 – вихревой стабилизатор; 3 – камера смешения первой ступени;
 4 – камера смешения второй ступени; 5 – корпус второй ступени; 6 – фланец крепления горелки;
 7 – регулирующий орган подачи топлива второй ступени; 8 – форсунка подачи топлива (или распылитель);
 9 – форсунка или сопло подачи воздуха второй ступени

Fig. 2. Single-channel adjustable cement burner [11]:
 1 – housing of the burner first stage; 2 – vortex stabilizer; 3 – mixing chamber of the first stage;
 4 – mixing chamber of the second stage; 5 – housing of the second stage; 6 – burner mounting flange;
 7 – fuel supply regulator of the second stage; 8 – fuel supply nozzle (or sprayer);
 9 – nozzle or air supply blowpipe of the second stage

зованием теплового потенциала продуктов обжига для предварительного подогрева сырья [13].

Повышение эффективности теплообменных процессов может быть достигнуто за счет:

- установки высокоэффективных регенеративных или рекуперативных теплообменных устройств (вращающихся воздухоподогревателей, трубчатых теплообменников);

- организации многоступенчатых схем теплообмена с рециркуляцией и каскадным использованием тепловой энергии.

Внедрение указанных технических решений позволит снизить расход топлива, уменьшить тепловые потери, а также повысить температуру воздуха, поступающего в зону горения, что в итоге приведет к повышению тепловой эффективности вращающейся печи.

Исследование процессов горения и теплоотдачи факела в рабочем пространстве печей для производства извести является важной задачей, так как определяет размеры технологической зоны обжига, интенсивность теплового воздействия на материал и состояние футеровки.

А.А. Ансимов и др. [14] разработали математическую модель и алгоритм расчета теплотехнических характеристик процесса обжига известняка во вращающейся печи. Авторами установлена эмпирическая

зависимость для определения длины факела газовой горелки, учитывающая такие параметры, как диаметр горелки, внутренний диаметр печи, расходы топлива и воздуха. Предложен подход к расчету средней эффективной температуры газового потока в зоне контакта с поверхностью обжигаемого известняка.

На основе разработанной модели проведено численное исследование влияния различных факторов на теплоотдачу факела и температурное состояние обжигаемого материала. Показано, что существенное влияние на теплоотдачу факела оказывают коэффициент избытка воздуха, температура нагрева воздуха, степень черноты футеровки печи и низшая теплота сгорания топлива [14]. При этом толщина футеровки оказывает менее значительное влияние. Для оптимизации режима обжига известняка предложен алгоритм расчета результирующего теплового потока факела в зону обжига. Данный алгоритм позволяет путем корректировки расхода топлива, коэффициента избытка воздуха и температуры его нагрева обеспечить требуемую температуру обжига известняка, исключая перегрев футеровки печи.

Э.Э. Меркер и др. [15] в своих работах также рассматривали вопросы повышения эффективности сжигания топлива во вращающихся печах для производства извести. Авторами отмечается, что важными факторами, определяющими теплообмен в рабочем пространстве

печи, являются длина и температура топливного факела. Характеристики факела, в свою очередь, зависят от конструкции и режимов работы горелочных устройств.

Проведенные исследования показывают, что оптимизация условий горения топлива и теплообмена в зоне обжига во вращающихся печах для производства извести является актуальной задачей. Разработанные математические модели и алгоритмы расчета позволяют определять рациональные параметры работы печей, обеспечивающие требуемые показатели качества извести при минимальных энергетических затратах.

Существующие конструкции характеризуются высокими выбросами оксидов азота и серы, а также значительными потерями теплоты с дымовыми газами [16].

Для решения данных проблем могут быть применены следующие технические решения:

- использование ступенчатого или двухстадийного сжигания топлива, позволяющего снизить образование NO_x ;

- организация рециркуляции дымовых газов для уменьшения избытка воздуха и температуры в зоне горения;

- применение низкоэмиссионных горелочных устройств, оборудованных системами автоматического регулирования подачи воздуха и топлива;

- внедрение систем каталитической или селективной некаталитической очистки отходящих газов от оксидов азота и серы.

Комплексное применение указанных мероприятий позволит снизить энергозатраты на процесс обжига, а также существенно уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Важным фактором, влияющим на эксплуатационные характеристики вращающихся печей, является надежность и долговечность их основных конструктивных элементов, таких как корпус (барабан) и футеровка [17].

Реализация технических решений будет способствовать увеличению срока службы печей, снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт, повышению общей надежности и экономической эффективности производства извести [18]. Для повышения эффективности работы вращающихся печей актуальным направлением является внедрение систем автоматического контроля и управления технологическим процессом. Это позволит обеспечить оптимальные режимы работы печи, стабильные условия обжига и, как следствие, высокое качество получаемой извести. Помимо совершенствования традиционных конструкций вращающихся печей, направленное на улучшение их эксплуатационных характеристик, перспективным направлением является разработка и внедрение нетрадиционных технических решений [19; 20]. Основными направлениями совершенствования конструкций вращающихся печей для производства извести являются:

- совершенствование систем загрузки и выгрузки сырьевых материалов;

- повышение эффективности теплообменных процессов;

- совершенствование системы сжигания топлива;

- совершенствование конструкции корпуса и футеровки;

- автоматизация управления технологическим процессом;

- использование нетрадиционных конструктивных решений.

Реализация данных направлений позволит повысить энергоэффективность, экологичность и экономическую эффективность производства извести во вращающихся печах, а также обеспечить высокое и стабильное качество готовой продукции.

Выводы

Анализ эксплуатационных характеристик существующей конструкции вращающейся печи диаметром 3,6 м и длиной 75 м для производства 360 т/сут извести выявил ряд недостатков и проблем, негативно влияющих на технико-экономические и экологические показатели данного технологического процесса. К основным проблемным аспектам относятся: ограниченные возможности повышения производительности, низкая энергетическая эффективность, трудности обеспечения стабильного качества обжига известняка, повышенный износ основных элементов конструкции, значительные выбросы диоксида углерода и других загрязняющих веществ.

Показаны основные направления совершенствования конструкции вращающейся печи для получения извести, реализация которых позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность производства извести во вращающихся печах, обеспечит высокое и стабильное качество готовой продукции с соблюдением экологических требований.

Обзор современного состояния производства извести и существующих конструкций вращающихся печей показал актуальность задачи совершенствования конструкции и тепловой работы вращающихся печей для реализации технологии производства извести из мела. Решение данной задачи имеет важное практическое значение для повышения эффективности и экологической безопасности данного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сивков А.С., Шумаков В.В. Производство извести для металлургического производства / *Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: Сборник статей по материалам XLV Международной студенческой научно-практической конференции*. 2016;9(44). URL: [https://sibac.info/archive/nature/9\(44\).pdf](https://sibac.info/archive/nature/9(44).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
2. Сивков А.С., Шумаков В.В., Мамонов Р.И. Исследование свойств мела АО «Лебединский ГОК» / *Научное сообщество*

- щество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам XLVIII Международной студенческой научно-практической конференции. 2016;11(47). URL: [https://sibac.info/archive/technic/11\(47\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/11(47).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
3. Сивков А.С., Шилов А.А. Исследование физико-механических характеристик мела и известняка с целью использования мела как сырья для производства извести / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам LXI Международной студенческой научно-практической конференции. 2018;1(60). URL: [https://sibac.info/archive/technic/1\(60\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/1(60).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
 4. Mikulic H., Berg E.V., Vujanovic M., Priesching P., Perkovic L., Tatschl R., Duic N. Numerical modelling of calcination reaction mechanism for cement production. *Chemical Engineering Science*. 2012;69(1):607–615. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.11.024>
 5. Sinhal K., Ghoshdastidar P.S., Dasgupta B. Computer simulation of drying of food products with superheated steam in a rotary kiln. *ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2012;4(1):011009. <https://doi.org/10.1115/1.4005256>
 6. Li S.Q., Ma L.B., Wan W., Yao Q. A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor. *Chemical Engineering Technology*. 2005;28(12):1480–1489. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500241>
 7. Guo Y.C., Chan C.K., Lau K.S. Numerical studies of pulverized coal combustion in a tubular coal combustor with slanted oxygen jet. *Fuel*. 2003;82(8):893–907. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00367-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00367-8)
 8. Сивков А.С., Шумаков В.В., Мамонов Р.И. Возможность использования мела для производства извести, применяемой в металлургии / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам XLVI Международной студенческой научно-практической конференции. 2016;9(45). URL: [https://sibac.info/archive/technic/9\(45\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/9(45).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
 9. Монастырев А.В. Производство извести. Москва: Высшая школа; 1971:272.
 10. Монастырев А.В., Галиахметов Р.Ф. Печи для производства извести. Воронеж: Истоки; 2011:392.
 11. Пат. 2079785 RU. Газовая горелка / Калашников Л.В., Калашников Г.Л.; заявл. 13.04.1995; опубл. 20.05.1997.
 12. Селиванов Н.И. Технология и оборудование для производства строительных материалов. Москва: Высшая школа; 2005:366.
 13. Алексеев А.Д. Теория и практика обжига известняка во вращающихся печах. Москва: Металлургия; 1973:344.
 14. Ансимов А.А., Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Кочетов А.И., Казарцев В.О. Исследование теплоотдачи факела и оптимизация режима обжига во вращающейся печи. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2013;(2-1(47)):5–9.
Ansimov A.A., Merker E.E., Kharlamov D.A., Kochetov A.I., Kazartsev V.O. Studying the heat transfer of the torch and optimization of the regime of firing in the revolver. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2013; (2-1(47)):5–9. (In Russ.).
 15. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 1995;(5):28–30.
Merker E.E., Kharlamov D.A., Ansimov A.A. Increasing the efficiency of fuel combustion in rotary kilns for lime roasting. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 1995;(5):28–30. (In Russ.).
 16. Шелудяк Б.Л. Технология производства извести. Москва: Стройиздат; 1988:272.
 17. Алексеев А.Д. Теория и практика обжига известняка во вращающихся печах. Москва: Металлургия; 2018:344.
 18. Кузнецов Н.В., Баскаков А.П. Теплотехника. Москва: Энергоатомиздат; 2018:479.
 19. Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou C.D., Goussis D.A., Burganos V.N. CFD predictions for cement kiln including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. *Applied Mathematical Modelling*. 1999;23(1):55–76. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10053-7](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10053-7)
 20. Mujumdar K.S., Ganesh K.V., Kulkarni S.V., Ranade V.V. Rotary cement kiln simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*. 2007;62(9):2590–2607. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.063>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Сивков, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: sivkovsasha777@yandex.ru

Светлана Игоревна Чибизова, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-9444-5670

E-mail: s.chibizova@misiss.ru

Анна Дмитриевна Апасова, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: annhope@bk.ru

Aleksandr S. Sivkov, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: sivkovsasha777@yandex.ru

Svetlana I. Chibizova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-9444-5670

E-mail: s.chibizova@misiss.ru

Anna D. Apasova, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: annhope@bk.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Сивков – выделение направлений оптимизации, разработка и применение модели теплового расчета, проведение экспериментов, оценка экологических и экономических эффектов.

С. И. Чибизова – выделение направлений оптимизации, проведение экспериментов.

А. Д. Апасова – аналитический обзор, описание научной новизны и практической значимости.

A. S. Sivkov – highlighting areas of improvement, development and application of a thermal calculation model, conducting experiments, assessment of environmental and economic effects.

S. I. Chibizov – highlighting areas of improvement, conducting experiments.

A. D. Apasov – analytical review, description of scientific novelty and practical significance.

Поступила в редакцию 26.03.2025

После доработки 29.04.2025

Принята к публикации 23.06.2025

Received 26.03.2025

Revised 29.04.2025

Accepted 23.06.2025