

РАЗРАБОТКА ТЕПЛООБМЕННОГО УСТРОЙСТВА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Карачевцева А.В.¹, Фадин Ю.М.¹, Анциферов С.И.¹, Бурьянов А.Ф.²

¹*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород;*

²*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

Ключевые слова: вращающаяся печь, обжиг, теплообменное устройство, цифровой двойник, тепловые потери.
Аннотация. В статье анализируются процесс обжига материалов и применяемое оборудование. Рассмотрено основное оборудование, применяемое для обжига клинкера, это вращающаяся печь, рассмотрен её принцип действия. Проведен анализ конструкции и определены основные недостатки данной машины. Рассмотрены конструкции различных теплообменных устройств, к которым относятся: футеровка, цепные завесы, перемешивающий теплообменник и тепловая рубашка. Приведены преимущества и недостатки различных теплообменных устройств. На основании данных анализа конструкций теплообменных устройств определено их назначение, направленное на снижение энергетических потерь и предотвращение образования горячих точек. Установлены требования, предъявляемые к теплообменным устройствам. Основываясь на выводах, предложено усовершенствование конструкции вращающейся печи. Использовалась программа САПР NX, в которой выполнена разработка цифрового двойника вращающейся печи. На основе цифрового двойника вращающейся печи была разработана конструкция теплообменного устройства. Также рассмотрены принцип действия теплообменных устройств и недостатки, которые позволяет решить данная инновация в будущем. Предлагаемое теплообменное устройство было проанализировано с аналогичными конструкциями. Были определены направления совершенствования теплообменных устройств вращающихся печей для снижения потери энергии. Сделаны обобщающие выводы.

DEVELOPMENT OF A ROTARY KILN HEAT EXCHANGER

Karachevtseva A.V.¹, Fadin Yu.M.¹, Antsiferov S.I.¹, Buryanov A.F.²

¹*Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod;*

²*National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow*

Keywords: rotary kiln, roasting, heat exchanger, digital twin, heat loss.

Abstract. The article analyzes the roasting process of materials and the equipment used. The main equipment used for firing clinker is considered, it is a rotating furnace, and its principle of operation is considered. The design analysis was carried out and the main disadvantages of this machine were identified. The designs of various heat exchange devices are considered, which include: lining, chain curtains, mixing heat exchanger and heat jacket. The advantages and disadvantages of various heat exchange devices are given. Based on the data from the analysis of the designs of heat exchange devices, their purpose is determined, aimed at reducing energy losses and preventing the formation of hot spots. The requirements for heat exchange devices have been established. Based on the findings, an improvement in the design of the rotating furnace is proposed. The NX CAD program was used, in which the development of a digital twin of a rotating furnace was carried out. The design of a heat exchange device was developed based on the digital twin of a rotating furnace. The principle of operation of heat exchange devices and the disadvantages that this innovation can solve in the future are also considered. The proposed heat exchange device was analyzed with similar designs. The directions of improving the heat exchange devices of rotating furnaces to reduce energy loss were identified. Generalizing conclusions are made.

Введение

В настоящее время строительные материалы, такие как цемент и его производные (бетон и железобетон), широко применяются в различных сферах строительства. Цемент по-прежнему считается самым простым, экономичным и универсальным материалом, для производства которого используются карбонатные породы, глина, опока, гипс и вода.

Существует три способа производства цемента: мокрый, сухой и комбинированный.

В цементной промышленности наиболее распространены печи мокрого и сухого способа производства. Однако в настоящее время наблюдается переход от мокрого способа к

сухому, поскольку последний является более экономически выгодным.

В процессе производства цемента при использовании сухого способа производства сырьевые материалы сначала тщательно смешиваются, данный процесс является одним из важнейших технологических стадий для приготовления сухих смесей, затем измельчаются и сушатся одновременно, а после корректируются [1]. Порошок, который получается в итоге (сырьевая мука) имеет влажность до 1% и затем подается в циклонные теплообменники и в печной агрегат на обжиг.

В запечных циклонных теплообменниках осуществляются процессы сушки, подогрева и декарбонизации (кальцинирования). При производстве цемента сухим способом кальцинирование происходит при достижении высоких температур, особенно во время экзотермических реакций, обжига и охлаждения, которые происходят во вращающейся печи [2]. Следовательно, в отличие от печей, применяемых при мокром способе производства цемента, печи для сухого способа имеют меньшие габариты [3].

К основным узлам печи относится корпус, который состоит из стальных обечаек, на которые закреплены бандажи. Через них корпус опирается на роликовые опоры, которые обеспечивают его вращение вокруг оси, осуществляемое в результате работы привода. Горелка осуществляет подачу и сгорание топлива. После чего в разгрузочной части печи клинкер поступает в холодильник. Движение сырья осуществляется из-за наклона до 4 % и постоянного вращения печи. Под действием силы тяжести материал движется вдоль корпуса и при этом проходит все стадии термообработки [4]. Безаварийная работа печи зависит от оптимизации теплообменных устройств [5].

Материалы и методы

На первом этапе был выполнен анализ существующих теплообменных устройств, в ходе которого были выявлены их преимущества и недостатки. На втором этапе, опираясь на полученные теоретические данные, было разработано проектирование теплообменного устройства для вращающейся печи.

Процесс цифрового проектирования теплообменного устройства и вращающейся печи проводился с применением системы автоматизированного проектирования NX.

Основная часть

Для улучшения процесса обжига материала и уменьшения расхода топлива предлагается установка дополнительного теплообменного устройства на горячем конце вращающейся печи. На ней может устанавливаться сразу несколько видов теплообменных устройств. Итак, рассмотрим варианты теплообменных устройств:

- футеровка – устанавливается обязательно;
- цепная завеса;
- тепловая рубашка;
- перемешивающие теплообменники (например, пересыпные полки).

Футеровка промышленных печей – это облицовка устойчивыми материалами с целью защиты корпуса вращающейся печи от теплового воздействия. Футеровка выбирается исходя из предназначения оборудования и характеристик материалов с целью термостойкости. Футеровка бывает следующих видов: огнеупорная; кислая; газоизоляционная.

Цепные завесы

Цепные завесы часто устанавливаются в зоне загрузки, где температура газа относительно низкая (~1070 К). Поверхности теплообменника контактируют с горячими газами и шламом, поступающими в печь. Осаждение шлама на теплообменнике замедляет продвижение сырья по длине корпуса и увеличивает скорость заполнения корпуса печи. Кроме того, улучшается перемешивание материалов, что приводит к более равномерной температуре по всей печи. Завесы можно разделить на цепные завесы (рис. 1, а), которые свободно свисают с обоих концов, и цепные завесы с гирляндной завесой (рис. 1, б).

Цепи в горячей зоне состоят из жаропрочной стали, а в зоне, которая имеет наименьшую температуру («холодная») там цепи выполняют из углеродистой стали.

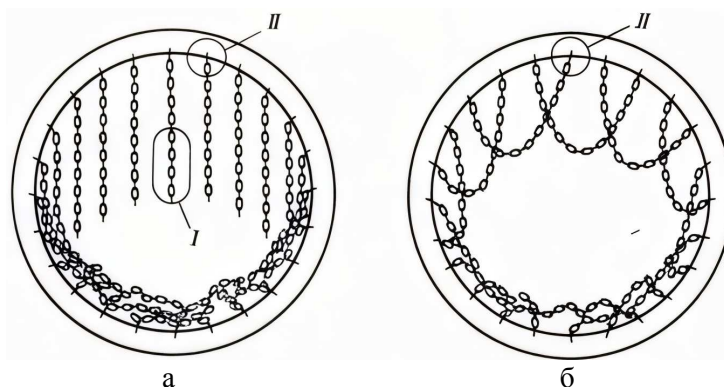


Рис. 1. Цепные завесы вращающихся печей:

а) подвесная цепная завеса с висящими концами; б) цепная завеса с гирляндной завесой;
I – часть конструкции цепной завесы; II – узел крепления цепи к корпусу печи

Перемешивающие теплообменники

Перемешивающие элементы (рис. 2) улучшают теплообмен и в тоже время не увеличивают пылеунос.

К внутренним теплообменным устройствам относятся пересыпные полки «сапожки» (рис. 3), которые устанавливаются в газовом потоке с температурой около 1250-1400°C. Такое устройство необходимо для того, чтобы часть сырья (материала) попадала в газовый поток и пересыпалась в нём. Количество полок должно быть таким, чтобы обеспечить условия для подъема и подачи материала в газовый поток. Материал сначала поднимается, а затем выгружается полками. За пересыпной полкой находится порог, высота которого не превышает 50% от сечения печи. Устройство позволяет увеличить производительность печи [6].

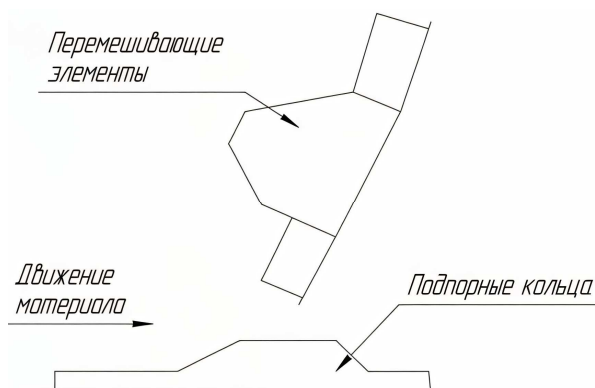


Рис. 2. Перемешивающий теплообменник

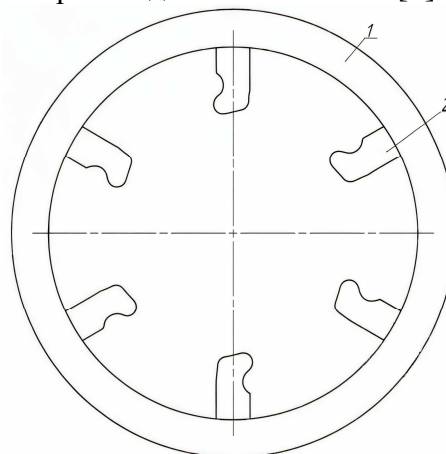


Рис. 3. Упрощенная схема вращающейся печи с полками: 1 – корпус; 2 – полки («сапожки»)

Теплообменное устройство (тепловая рубашка)

Тепловые рубашки расположены в горячей части вращающейся печи. Дальше в нижней части теплообменного устройства расположено отверстие, предназначенное для подачи воды. Подаваемая в теплообменник устройство вода отводит тепло от корпуса печи, позволяя при этом избегать образования горячих точек и прогорания корпуса. Ввиду нагрева воды до высоких температур происходит ее превращение в пар, выходящий через отверстие, расположенное в верхней части корпуса и отводится по трубопроводу в парогенератор.

Пар преобразуется в электричество, что позволяет снизить затраты на электроэнергию при производстве цемента [7]. Тепловое устройство в виде тепловых рубашек не влияет на производительность, но оно может повлиять на надежность корпуса за счёт снижения его температуры.

Рассмотрена усовершенствованная цифровая модель печного агрегата с добавлением теплообменного устройства. В перспективе предполагается, что данная модернизация

позволит сократить энергию, затрачиваемую на обжиг клинкера и повысит срок службы вращающейся печи.

В проекте применялась САПР NX, предназначенной для решения широкого круга задач по оптимизации технологических и конструктивных параметров печных агрегатов, с учетом режимов их работы и повышения энергоэффективности процесса обжига. Цифровой двойник оборудования используется для инженерного анализа, виртуальных испытаний и моделирования физических процессов, протекающих в печи, с целью определения рациональных параметров конструкции и режимов работы печи.

Новая конструкция теплообменного устройства была разработана с помощью системы автоматизированного проектирования Siemens NX на основе цифрового двойника вращающейся печи $\varnothing 4 \times 60$ м (рис. 4) для производства цемента сухим способом.

Вращающаяся печь состоит из уплотнения горячего конца 1, которое крепиться к корпусу 3, затем вся эта конструкция устанавливается на роликоопоры 2. Данная конструкция приводится в действие с помощью привода 7 и зубчатого колеса 6 (рис. 4). На конце корпуса крепиться уплотнение холодного конца, оно также, как и уплотнение горячего, предназначено для сокращения пылеуноса и снижения потерь тепла [8].

Теплообменное устройство вращающейся печи (рис. 5) состоит из обечайек 1 и 3, на которые крепится уплотнительное устройство 2 и корпус 4. Сверху него устанавливается теплоизоляционный слой 5.

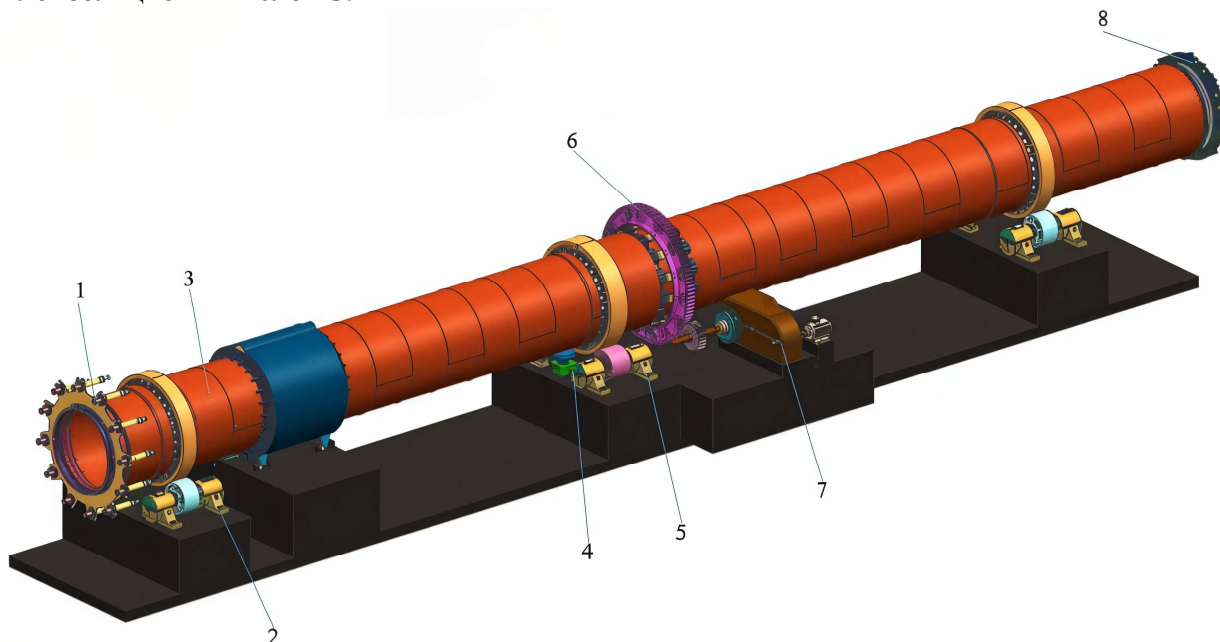


Рис. 4. Цифровой двойник вращающейся печи: 1 – уплотнение горячего конца; 2 – роликоопора; 3 – корпус; 4 – ролик упорный; 5 – роликоопора; 6 – открытая зубчатая передача; 7 – привод; 8 – уплотнение холодного конца печи; 9 – теплообменное устройство

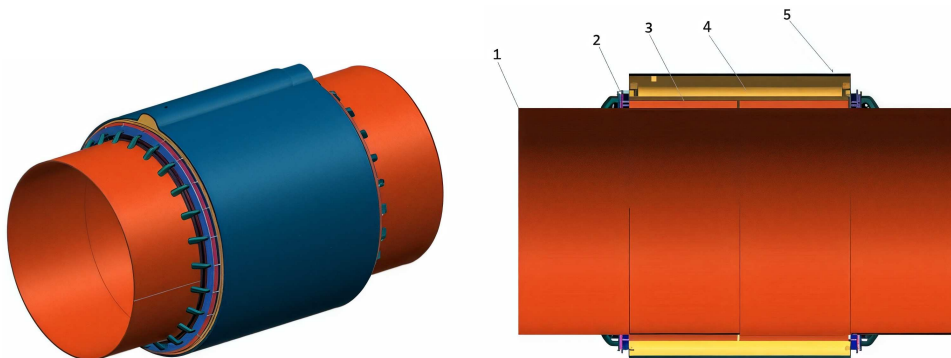


Рис. 5. Теплообменное устройство вращающейся печи: 1 – обечайка; 2 – уплотнительное устройство; 3 – обечайка с лепестками; 4 – корпус; 5 – теплоизоляционный слой

Разработанная конструкция теплообменного устройства позволяет сократить затраты энергии на обжиг цементного клинкера, а также перерабатывать тепло выделяемое корпусом печи в электроэнергию. Данное устройство позволит избежать точки повышенных температур на горячем конце печи и повысить тепловое КПД процесса обжига [9, 10].

Также после установки теплообменного устройства были проведены расчеты экономической эффективности внедрения модернизации.

NPV , ЧДД – это интегральный экономический эффект, представляющий собой разницу между доходами от реализации, и всеми видами затрат с учетом фактора времени [11].

$$NPV = \sum (P_n \cdot 1/(1+r)^n) - IC. \quad (1)$$

где P_n – денежные средства поступающие в течение; IC – инвестиции, которые вкладывают в проект; r – ставка дисконтирования (20%); n – количество периодов времени.

$$NPV = 2885,921 \text{ тысяч рублей.}$$

Если $NPV > 0$, то и соответственно проект будет экономически целесообразен.

PI , ИД – это индекс доходности, который представляет собой отношение приведенных эффектов к (дисконтированным) капиталовложениям.

$$PI = \sum (P_n / (1+r)^n) / IC, \quad (2)$$

$$PI = 1,96.$$

В данном случае, когда $PI > 1$ принято считать что результаты составляют больше затрат, в соответствии с этим проект считается эффективным.

Срок окупаемости ($T_{ок}$) – минимальный период (с начала реализации проекта), в течение которого интегральные экономические выгоды становятся положительными и остаются таковыми в дальнейшем.

$$T_{603} = t_x + |NPV_t| / NPV_{t+1}. \quad (3)$$

где t_x – количество периодов, при которых $NPV < 0$ в годах; NPV_t – величина NPV в t -м периоде; NPV_{t+1} – величина NPV в $t + 1$ периоде.

$$T_{603} = 2,71 \text{ года; } T_{ок} = 1,71 \text{ года.}$$

Так как $NPV > 0$, $PI > 1$, $IRR > 20\%$ и $T < 5$ лет, то предлагаемый проект можно считать эффективным.

На рисунке 6 представлена зависимость чистого дисконтированного дохода от времени начала эксплуатации внедренного теплообменного устройства.

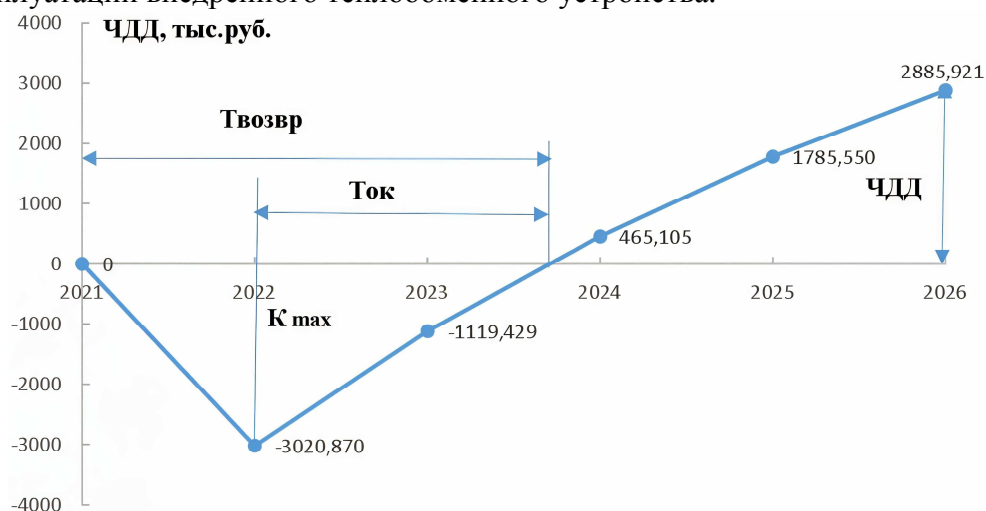


Рис. 6. Финансовый профиль проекта при расчете с использованием

В результате внедрения теплообменника новой конструкции увеличился объем производства. Экономический интегральный эффект NPV составил 2885,921 тыс. рублей, индекс доходности PI составил 1,96, а срок окупаемости – 1,71 года. Такие расчетные показатели были получены, и они свидетельствуют об экономической целесообразности внедрения проекта.

Заключение

Таким образом, были определены направления совершенствования теплообменных устройств. На основе цифрового двойника вращающейся печи была разработана конструкция теплообменного устройства, позволяющая сократить расходы электроэнергии, избежать «горячих точек» на горячем конце печи и повторно использовать тепло выделяемое корпусом вращающейся печи.

Также были проведены сравнения при использовании традиционного проектирования и применение CAD/CAM/CAE систем NX под управлением PLM-системы управлением Teamcenter в проектировании. Показатели при традиционном проектировании более низкие и срок окупаемость дольше, чем при применении современных систем проектирования. Также их использование, позволяет сократить время на проектирование и использовать все возможности цифрового двойника, т.е. проводить статические расчеты, кинематические расчеты и т.д.

Внедрение теплообменных устройств (тепловых рубашек) позволяет повысить производительность и улучшить качество получаемого продукта.

Список литературы

1. Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Yerofeyev V.T. Optimization of mixing process for heat-insulating mixtures in a spiral blade mixer // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, vol. 8, iss. 3, pp. 15146-15155.
2. Ерыгина А.О., Мишин Д.А., Классен В.К. Последовательность взаимодействий Na_2O с клинкерными минералами при их различных сочетаниях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – №12. – С. 98-104. – DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543.
3. Ёкубов М.М., Угли Мухитдинов Р.Б., Леженкин Н.И. Строение и принцип работы вращающейся печи // Science and Education. – 2022. – Т. 3, №6. – С. 553-557.
4. Борщевский А.А., Ильин А.С. Механическое оборудование предприятий для производства строительных материалов и изделий. – М.: Альянс, 2009. – 368 с.
5. Borisov I.N., Mandrikova O.S., Mishin D.A., Goloviznina T.E. Impact of the use of combustible technogenic waste on physical and chemical processes of cement production and properties // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, vol. 8, iss. 4, pp. 22486-22495.
6. Peter J. Witt, Julian Johnson M. PhilipSchwarz. An efficient method for computational flow-based simulation of heat transfer in a rotary kiln with pilot scale validation // Applied Thermal Engineering. 2022, vol. 214, p. 118894. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118894.
7. Okoji A.I., Anozie A.N., Omoleyc J.A. Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks // Alexandria Engineering Journal. 2022, vol. 61, iss. 7, pp. 5097-5109.
8. Зуев В.И., Микалуцкий А.Е. Совершенствование известеобжиговых вращающихся печей // Строительные материалы. – 2017. – №3. – С. 62-68.
9. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants // Engineering Failure Analysis. 2020, vol. 118, p. 104896. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.
10. Mittal A., Rakshit D. Utilization of cement rotary kiln waste heat for calcination of phosphogypsum // Thermal science and Engineering Progress. 2020, vol. 20, p. 100729. doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100729.
11. Бодруг Н.С., Проценко П.П. Расчет экономической эффективности проекта // Символ науки: международный научный журнал. – 2016. – №11-3. – С. 35-37.

References

1. Zagorodnjuk L.H., Lesovik V.S., Volodchenko A.A., Yerofeyev V.T. Optimization of mixing process for heat-insulating mixtures in a spiral blade mixer // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, vol. 8, iss. 3, pp. 15146-15155.
2. Erygina A.O., Mishin D.A., Klassen V.K. The sequence of Na_2O interactions with clinker minerals in their various combinations // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2018, no. 12, pp. 98-104. DOI: 10.12737/article_5c1c99666664a6.34309543.
3. Yokubov M.M., Mukhitdinov R.B., Lezhankin N.I. Structure and principle of operation of a rotary kiln // Science and Education. 2022, vol. 3, no. 6, pp. 553-557.
4. Borshchevsky A.A., Ilyin A.S. Mechanical equipment of enterprises for the production of building materials and products – М.: Alliance, 2009. – 368 p.
5. Borisov I.N., Mandrikova O.S., Mishin D.A., Goloviznina T.E. Impact of the use of combustible technogenic waste on physical and chemical processes of cement production and properties // International Journal of Pharmacy & Technology. 2016, vol. 8, iss. 4, pp. 22486-22495.

6. Peter J. Witt, Julian Johnson M. PhilipSchwarz. An efficient method for computational flow-based simulation of heat transfer in a rotary kiln with pilot scale validation // Applied Thermal Engineering. 2022, vol. 214, p. 118894. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118894.
7. Okoji A.I., Anozie A.N., Omoleye J.A. Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks // Alexandria Engineering Journal. 2022, vol. 61, iss. 7, pp. 5097-5109.
8. Zuev V.I., Mikalutskiy A.E. Improvement of rotary kilns // Building materials. 2017, no. 3, pp. 62-68.
9. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants // Engineering Failure Analysis. 2020, vol. 118, p. 104896. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.
10. Mittal A., Rakshit D. Utilization of cement rotary kiln waste heat for calcination of phosphogypsum // Thermal science and Engineering Progress. 2020, vol. 20, p. 100729. doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100729.
11. Bodrug N.S., Protsenko P.P. Calculation of the economic efficiency of the project // Symbol of Science: International Scientific journal. 2016, no. 11-3, pp. 35-37.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Карачевцева Анастасия Владимировна – аспирант	Karachevtseva Anastasia Vladimirovna – postgraduate student
Фадин Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механического оборудования»	Fadin Yuri Mikhailovich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department mechanical equipment
Анциферов Сергей Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механического оборудования»	Antsiferov Sergey Igorevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of mechanical equipment
Бурьянов Александр Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительное материаловедение» karachevtseva.anastasiia@gmail.com	Buryanov Aleksandr Fedorovich – doctor of technical sciences, professor of the Department of building materials science

Получена 20.02.2025