

УДК 666.94

А. В. Карачевцева¹,

Ю. М. Фадин², кандидат технических наук, доцент,

С. И. Анциферов³, кандидат технических наук,

А. Ф. Бурьянов⁴, профессор, доктор технических наук

^{1,2,3}Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», ул. Костюкова, 46, 308012 Белгород, Российская Федерация, ¹karachevtseva.anastasiia@gmail.com

⁴Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Ярославское шоссе, 26, 129337 Москва, Российская Федерация, rga-service@mail.ru

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ РЕКУПЕРАТОРНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ С ВНЕШНИМИ ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Статья посвящена прочностному анализу рекуператорного охладителя вращающейся печи $\text{Ø}4 \times 127$ м, используемой в цементной промышленности. В работе представлены результаты исследования, проведенного на основе цифрового двойника печи в целях оценки влияния увеличения производительности на эксплуатационные нагрузки, действующие на рекуператорный охладитель. Описаны конструктивные особенности вращающейся печи, включая её основные элементы: корпус, опорные станции, привод, зубчатый венец и рекуператорный охладитель. Для анализа использовалась конечно-элементная модель, созданная в специализированном программном обеспечении. В процессе исследования были определены нагрузки, действующие на рекуператор, и проведены расчеты напряжений и деформаций. Результаты показали, что рекуператор обладает достаточным запасом прочности и жесткости при увеличении производительности печи на 20 %. Условия прочности и жесткости были проверены, все расчетные параметры соответствуют допустимым значениям. Работа подтверждает возможность повышения производительности вращающейся печи без ущерба для её надежности.

Ключевые слова: вращающаяся печь; рекуператорный охладитель; прочностной расчёт; конечно-элементная модель; цифровой двойник; теплообменное устройство.

Рис. 11. Табл. 1. Библиогр.: 12 назв.

A. V. Karachevtseva¹,

Yu. M. Fadin², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

S. I. Antsiferov³, PhD in Technical Sciences,

A. F. Buryanov⁴, DSc in Technical Sciences, Professor

^{1,2,3}Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46 Kostyukova Str., 308012 Belgorod, Russian Federation, ¹karachevtseva.anastasiia@gmail.com

⁴Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Highway, 129337 Moscow, Russian Federation, rga-service@mail.ru

STRENGTH ANALYSIS OF A ROTARY KILN RECUPERATOR REFRIGERATOR WITH EXTERNAL HEAT EXCHANGERS

The present article is devoted to the strength analysis of the recuperator cooler of a rotary kiln of the $\text{Ø}4 \times 127$ m type, which is utilised in the cement industry. The paper presents the findings of a study conducted on the basis of the digital twin of the furnace. The aim of the study was to assess the impact of increased productivity on the operational loads acting on the recuperator cooler. The design features of a rotary kiln are described, including its main elements: housing, support stations, drive, gear ring and recuperator cooler. The analysis was conducted utilising a finite element model, which was created in a specialised software program. The study involved the determination of the loads acting on the heat exchanger and the subsequent performance of stress and strain calculations. The study's findings indicated that the recuperator demonstrated

adequate strength and rigidity, contributing to a 20 % increase in furnace productivity. The strength and stiffness conditions have been verified, and all design parameters correspond to acceptable values. The study thus confirms the possibility of enhancing the productivity of a rotary kiln without compromising its reliability.

Key words: rotating furnace; recuperator cooler; strength calculation; finite element model; digital twin; heat exchangers.

Fig. 11. Table 1. Ref.: 12 titles.

Введение. В настоящее время одной из наиболее значимых отраслей промышленности России является промышленность строительных материалов. В свою очередь, производство строительных материалов по объему производства и потребления разделяется на основные товарные подгруппы. Так, лидирующую позицию с большим отрывом занимает производство цемента. По последним данным, за 2023 год в России производство цемента составило 62,6 млн т, а объемы потребления — примерно 64,9 млн т. Такие значительные показатели объясняются тем, что цемент — основной строительный материал. Процесс производства цемента является весьма дорогостоящим и энергоемким, поэтому на данный момент стремительными темпами создаются решения по увеличению объемов выпускаемой продукции с максимально возможным уменьшением удельных энергозатрат на ее производство [1]. Таким образом, совершенствование технологических процессов и оборудования промышленности строительных материалов является актуальной задачей [2].

На сегодня существует два основных способа производства цемента:

– мокрый — все сырьевые компоненты измельчаются в процессе смешивания с водой, тем самым образуется шлам влажностью 35...40 %, который затем подвергается термической обработке;

– сухой — влажные сырьевые компоненты измельчаются, затем подвергаются сушке, вследствие чего получается сырьевая мука влажностью не более 1 %.

Клинкер выступает в качестве промежуточного продукта в технологии производства цемента. Он образуется в результате равномерного обжига измельченной смеси сырья, которая состоит из известняка, глины и шлаков. Обжиг клинкера выполняется во вращающейся печи.

Вращающиеся печи используются как при сухом, так и при мокром способе производства, но с рядом отличительных особенностей. Именно вращающиеся печи определяют производительность цементного завода, поэтому совершенствование ее конструкции в целях снижения удельных энергозатрат и повышения производительности является самой востребованной темой исследования.

На территории Российской Федерации подавляющее число предприятий, которые производят цемент, применяют мокрый способ производства. При этом способе применяются длинные вращающиеся печи от 80 до 230 м с шестью зонами, распределенными по всей длине печи. Зона охлаждения является заключительной зоной, в которой происходит одноименный процесс — охлаждение клинкера, для которого применяются различные виды охлаждающих устройств, такие как барабанные, колосниковые или рекуператорные охладители.

Печи отечественных заводов производства цемента в основном оснащены рекуператорными охладителями. Такие охладители располагаются на разгрузочном конце печи и направлены на повышение эффективности охлаждения материала.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились на основе цифрового двойника вращающейся печи $\varnothing 4 \times 127$ м, производительность которой была повышена [3]. Повышение производительности печи привело к увеличению эксплуатационных нагрузок, действующих на рекуператорный охладитель [4].

Конструкция печи (рисунок 1) состоит из сварных листовых обечаек корпуса 1, который изнутри футеруется огнеупорным кирпичом. На корпусе печи на определенном расстоянии друг от друга располагаются опорные станции 2. С помощью кольцевых бандажей прямоугольного сечения корпус печи опирается на ролики опорной станции. Размеры и количество бандажей, как и количество опорных станций, варьируются в зависимости от диаметра и длины печи соответственно [5].

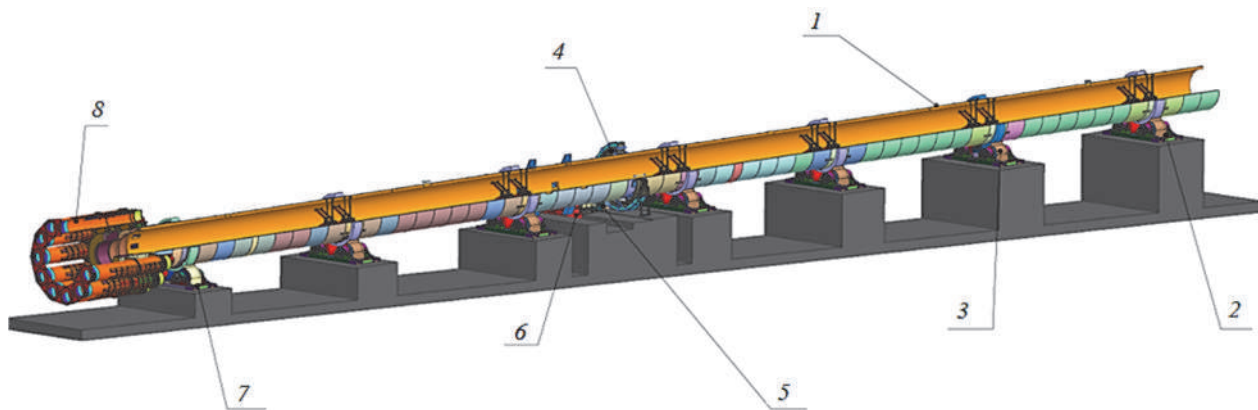
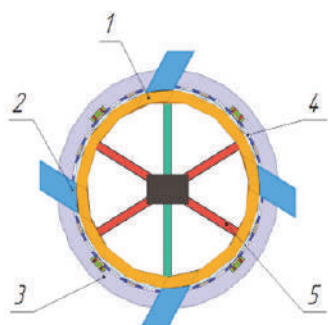


Рисунок 1. — Цифровой двойник вращающейся печи



1 — футеровка; 2 — теплообменное устройство; 3 — бандаж;
4 — корпус; 5 — распорка

Рисунок 2. — Цифровой двойник вращающейся печи с внешними теплообменными устройствами

Конструкция опорно-упорной станции 3 отличается от конструкции опорной станции наличием на раме закрепленного узла предохранительного упора, предотвращающего осевое смещение корпуса. Ролик предохранительного упора способен удерживать корпус лишь в течение ограниченного времени, и, если не будут предприняты необходимые меры, бандажи могут соскользнуть с опорных роликов. В этом случае бандаж контактирует с роликом предохранительного упора своей торцевой поверхностью [6].

Корпус печи вращается приводом 6, включающим в себя электродвигатель, редуктор и вспомогательное устройство, а также зубчатым венцом 4, который состоит из установки подвенцово́й шестерни 5 и зубчатого колеса. Энергия передается от электродвигателя через редуктор, поступает на подвенцовую шестерню, а далее передается на зубчатый венец, закрепленный по окружности вращающейся печи. В горячем конце печи расположена подрекуператорная опорная станция 7 и рекуператорный охладитель 8 (см. рисунок 1).

Особенностью данной печи является наличие внешних теплообменных устройств 2 (рисунок 2), которые расположены по периферии корпуса 4. Установка внешних теплообменных устройств по периферии корпуса печи позволяет решить проблему недостаточного подъема материала со дна, а также способствует его перемещению, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему улучшению процесса.

Рекуператорная установка включает в себя 11 небольших охлаждающих барабанов, равномерно расположенных по периферии корпуса печи и установленных на подрекуператорную обечайку (рисунок 3).

Материал поступает в рекуператор (рисунок 4) под действием силы тяжести благодаря вращению печи. Для оптимизации процесса пересыпания клинкера во время вращения печи внутренняя часть рекуператора, находящаяся со стороны горячего конца, облицована броневыми плитами 4, 6, которые оборудованы различными типами полок из жаропрочного чугуна.

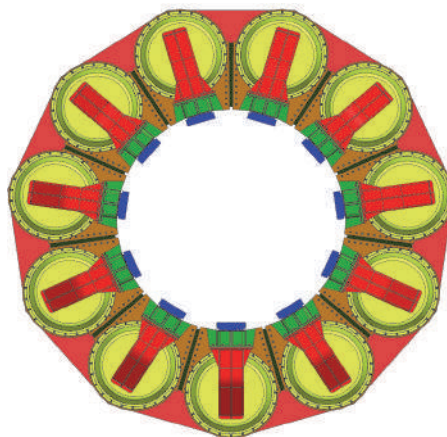
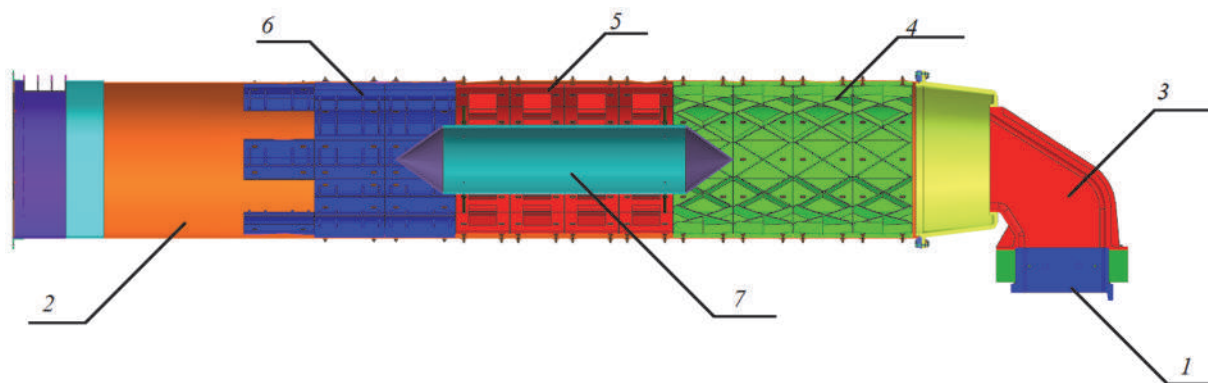


Рисунок 3. — Установка рекуператорного охладителя



1 — стакан; 2 — корпус; 3 — лейка; 4, 6 — бронеплита; 5 — конус;
6 — бронеплита; 7 — вставка

Рисунок 4. — Рекуператор

В данной цифровой модели применяется вращающаяся печь, оснащенная блоком рекуператоров, в которых установлены специальные цилиндрические вставки 7 и пересыпные полки, которые располагаются внутри, предназначенные для повышения эффективности охлаждения клинкера. Цилиндрические вставки фиксируются на барабане рекуператора с помощью кронштейнов.

Результаты исследования и их обсуждение. Прочностной анализ рекуператорного холодильника выполняется в несколько этапов.

Для расчёта рекуператорных охладителей разрабатывается конечно-элементная модель. Создание конечно-элементной сборки осуществляется с использованием приложения «Пре/постпроцессор» [7].

Первым этапом расчетного процесса является назначение материалов и их физико-механических свойств для электронно-цифровых моделей (рисунок 5) [8; 9].

Следующим шагом происходит создание конечно-элементной сетки для геометрических моделей, участвующих в расчете (рисунок 6).

После создания всех необходимых для расчета конечно-элементных моделей создается конечно-элементная сборка (рисунок 7).

В соответствии с расчётной схемой (рисунок 8) определено, что основными нагрузками, действующими на рекуператор, является собственный вес, вес бронеплит и материалов (таблица 1).

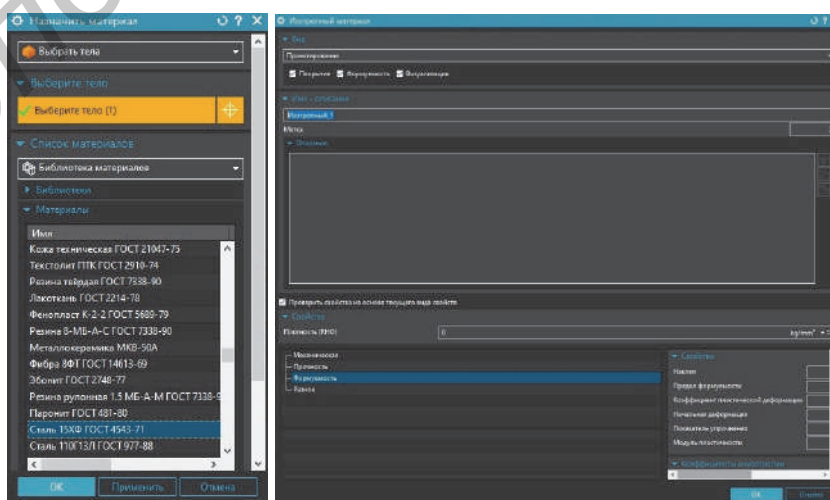


Рисунок 5. — Создание и назначение материала

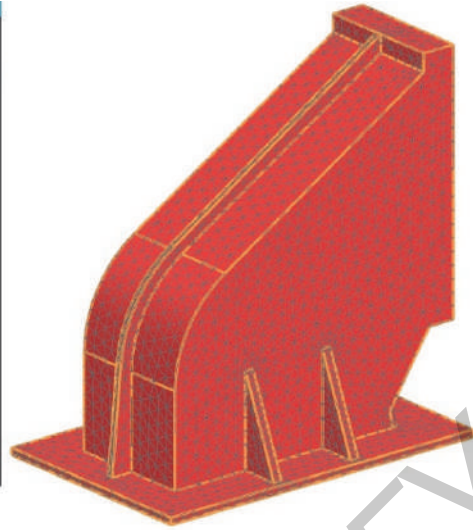
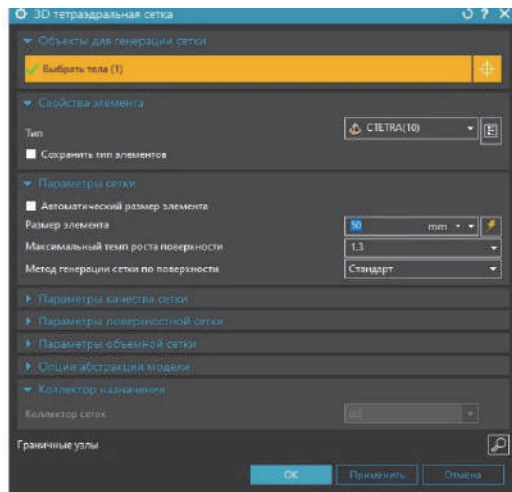


Рисунок 6. — Создание конечно-элементной сетки на модель

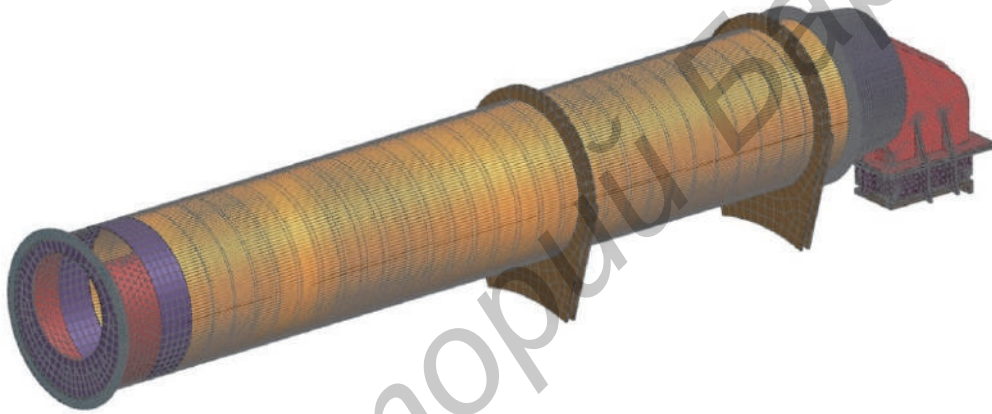


Рисунок 7. — Подготовка конечно-элементной сборки для симуляции

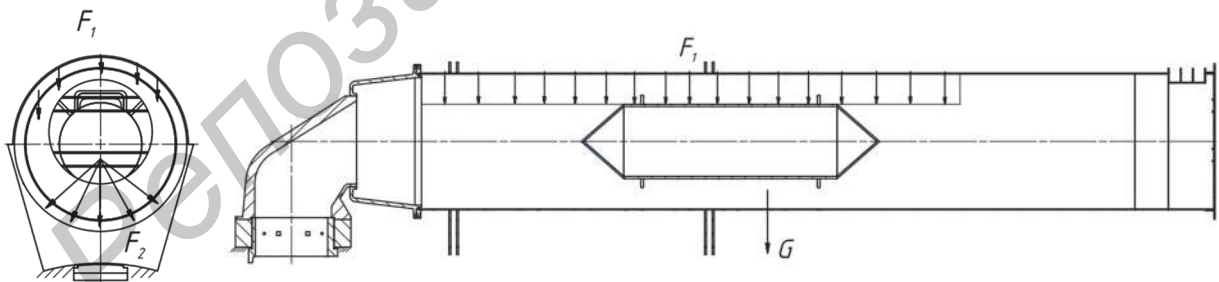


Рисунок 8. — Расчетная схема

Т а б л и ц а 1. — Нагрузки

Наименование	Обозначение	Значение, Н
Собственный вес	G	75 702
Вес бронеплит	F1	95 805
Вес материала	F2	12 760

На основании расчётной схемы выполняется разработка моделей симуляции (рисунок 9) и задание граничных условий, таких как нагрузки, закрепления и взаимодействие между конечно-элементными моделями.

Далее выполняется анализ результатов прочностного расчёта. На рисунках 10 и 11 представлены диаграмма распределения перемещений и диаграмма распределения напряжений по Мизесу [7].

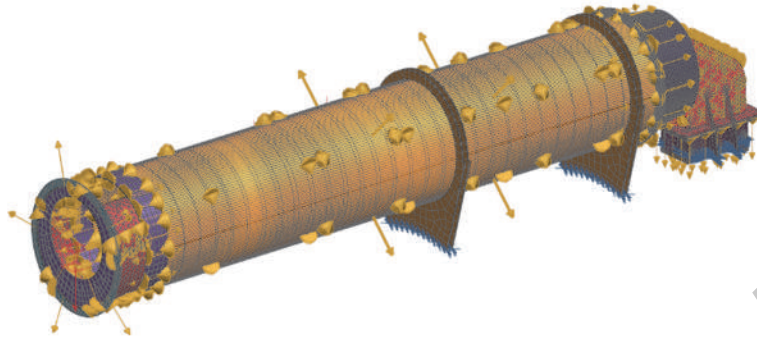


Рисунок 9. — Процесс задания нагрузок, склеивания и ограничения

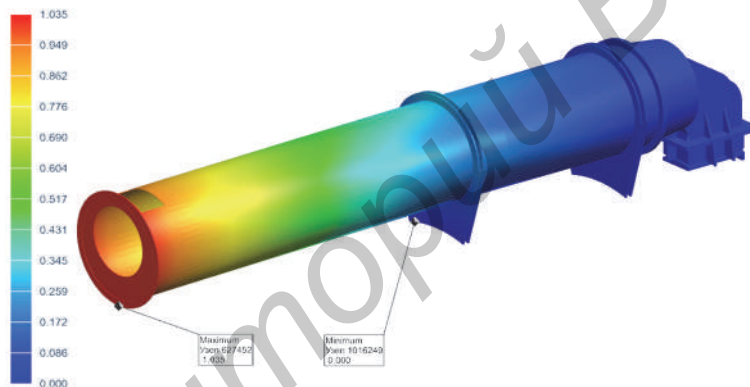


Рисунок 10. — Диаграмма распределения перемещений

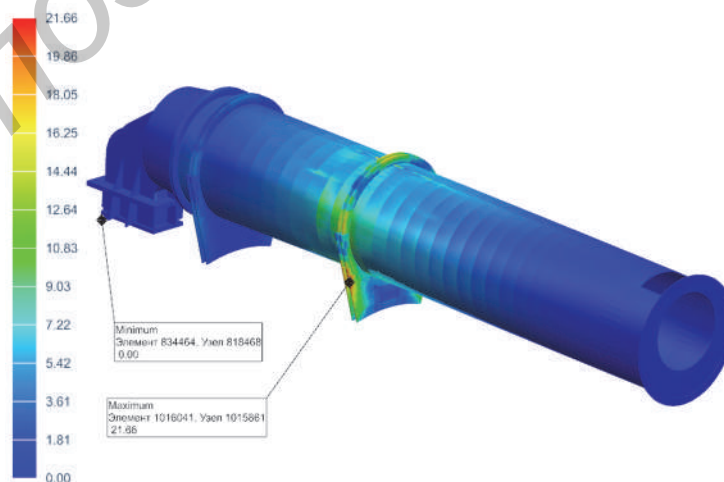


Рисунок 11. — Диаграмма распределения напряжений по Мизесу

Заключение. Работоспособность конструкции рекуператора обеспечивается при соблюдении требований к прочности и жесткости.

Прочностной расчет предполагает сравнение максимальных расчетных напряжений с допускаемыми значениями для выбранного материала и определение коэффициента запаса прочности:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \geq [n],$$

где n — коэффициент запаса прочности;

$[\sigma]$ — допускаемые напряжения для выбранного материала;

σ_{\max} — максимальные расчетные напряжения;

$[n]$ — допускаемый коэффициент запаса прочности, $[n] = 1,5 \dots 2,4$ [10; 11].

Условия жесткости — это сравнение максимальных перемещений с допускаемыми:

$$\delta_{\max} \leq [\delta],$$

где δ_{\max} — максимальные расчетные перемещения;

$[\delta]$ — допускаемые перемещения, $[\delta] = \frac{1}{250} a$, где a — габаритный размер конструкции.

Выполняется проверка условий прочности и жесткости для корпуса рекуператора ($\sigma_{\max} = 24$ МПа, $[\sigma] = 420$ МПа, $a = 8\,160$ мм, $\delta_{\max} = 1,042$ мм); $n = \frac{410}{24} = 17,08 \geq 1,5$.

Условие прочности выполняется.

$$[\delta] = \frac{1}{250} \cdot 10\,500 = 42 \text{ мм}; 1,042 \leq 42.$$

Условие жесткости выполняется.

Проведенный расчет прочностных характеристик рекуператора позволил определить, что он обладает достаточным коэффициентом запаса прочности при повышении производительности вращающейся печи — 20 % [11; 12].

Список цитируемых источников

1. *Копелевич, В. М.* Топливо цементной промышленности. — М. : Стройиздат, 1984. — 160 с.
2. *Нусс, М. В.* Управление работой цементной вращающейся печи / М. В. Нусс, П. А. Трубаев, В. К. Классен // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 1. — С. 61—65.
3. NX для конструктора машиностроителя / П. С. Гончаров, М. Ю. Ельцов, С. Б. Коршиков [и др.]. — М. : ДМК Пресс, 2010. — 504 с.
4. Печные агрегаты цементной промышленности / С. Г. Силенок, Ю. С. Гризак, В. Н. Лямин [и др.]. — М. : Машиностроение, 1994. — 168 с.
5. *Лисиенко, В. Г.* Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология : в 2 кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. — М. : Теплотехник, 2004. — 687 с.
6. *Хородов, Е. И.* Печи цементной промышленности / Е. И. Хородов. — 2-е изд. — Л. : Изд-во лит. по строительству, 1968. — 450 с.
7. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / П. С. Гончаров, И. А. Артамонов, Т. Ф. Халитов [и др.]. — М. : ДМК Пресс, 2012. — 504 с.
8. *Данилов, Ю.* Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. — М. : ДМК Пресс, 2011. — 332 с.
9. Проектирование в NX под управлением Teamcenter / М. Ю. Ельцов, А. А. Козлов, А. В. Седойкин, Л. Ю. Широкова. — 2-е изд. — М. : ДМК Пресс, 2023. — 753 с.

10. *Фадин, Ю. М.* Теоретические основы расчета технологических комплексов производства строительных материалов и изделий : учеб. пособие / Ю. М. Фадин, А. С. Ильин. — Белгород : Изд-во БГТУ им. Шухова, 2010. — 173 с.

11. *Кузнецов, Н. В.* Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). — М. : Энергия, 1973. — 296 с.

12. *Класен, В. К.* Технология и оптимизация производства цемента / В. К. Класен ; БГТУ им. В. Г. Шухова. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 307 с.

Поступила в редакцию 27.03.2025.

Репозиторий БарГУ