

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ С ТЕПЛООБМЕННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Аннотация. Статья посвящена исследованию процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи для обжига клинкера, оснащенной теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда, что актуально. Для оптимизации геометрических параметров теплообменных устройств было проведено цифровое моделирование в специализированных программных комплексах, что позволило сократить время на проектирование, а также дало возможность детально изучить распределение материала в зонах печи. Было произведено моделирование в поперечном сечении печи в зоне декарбонизации для четырех и шести теплообменных устройств с углами наклона от 30° до 50° с шагом в 5° . Результаты моделирования показали, что наиболее целесообразно использовать угол их наклона $\alpha=45^\circ$, при этом в зону 1 при выгрузке распределяется материала в 2 раза и 1,6 раза больше, чем во 2-ой зоне, в случае с шестью и четырьмя теплообменными устройствами соответственно. В рассматриваемой зоне располагается масса материала примерно на 5-10% меньше максимальной, соответствующего углу наклона 40° для обоих рассматриваемых случаев. Целесообразно использовать четыре теплообменных устройства, так как при увеличении отверстий в корпусе, снижается его прочность, что требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: вращающаяся печь, теплообменные устройства, цифровое моделирование, метод дискретных элементов, обжиг клинкера, теплообмен.

Введение. Основными направлениями развития конструкций вращающихся печей являются увеличение их производительности и энергоэффективности за счет интенсификации процессов теплообмена с внедрением современных технологий. Вращающиеся печи широко используются в цементной, металлургической, химической и других видах промышленности для обжига, сушки и термической обработки материалов [1, 2]. Например, крупнейшие вращающиеся печи для производства цемента по мокрому способу достигают длины 185–230 метров и диаметра 5–7 метров. В последнее время повышение потребности в термически обработанных материалов привело к распространению использования внутренних и внешних теплообменных устройств во вращающихся печах [3].

Теплообменные устройства повышают эффективность процесса обжига клинкера, т.к.:

- увеличивают теплообмен, при нахождении материала в теплообменных устройствах увеличивается площадь контакта между горячими газами и сырьем, что способствует более эффективной передаче тепла, а это снижает потери энергии, повышая общую эффективность печи;

- снижают температуру отходящих газов, т.е. горячие газы отдают больше тепла материалу, что снижает их температуру на выходе из печи и позволяет экономить топливо, уменьшая тепловые потери;

- увеличивают производительность, за счёт улучшенного теплообмена, потому что больше материала может быть обработано за единицу времени.

Обжигаемый материал имеет два основных режима движения при вращении печи. При первом режиме он представлен гранулами, которые свободно перекатываются. В результате слой, контактирующий с горячим газовым потоком постоянно обновляется, замещаясь более холодными гранулами, что поддерживает более высокий градиент температуры и повышает интенсивность теплообмена [4–5].

Во втором режиме, когда материал пылеобразен, и имеет невысокий угол подъема в горячем состоянии во время вращения печи, тогда слои, контактирующие с горячим газовым потоком, не обновляются. Градиент температуры в рассматриваемом режиме меньше, чем у первого режима, поэтому интенсивность теплообмена гораздо ниже [6].

Рассмотрим движение материала в печи в виде гранул, при котором частицы поднимаясь до угла динамического откоса (рис. 1) свободно скатываются вниз. В режиме скатывания угол сыпания материала постоянен, а эффективность теплообмена при перемешивании материала максимальна [7].

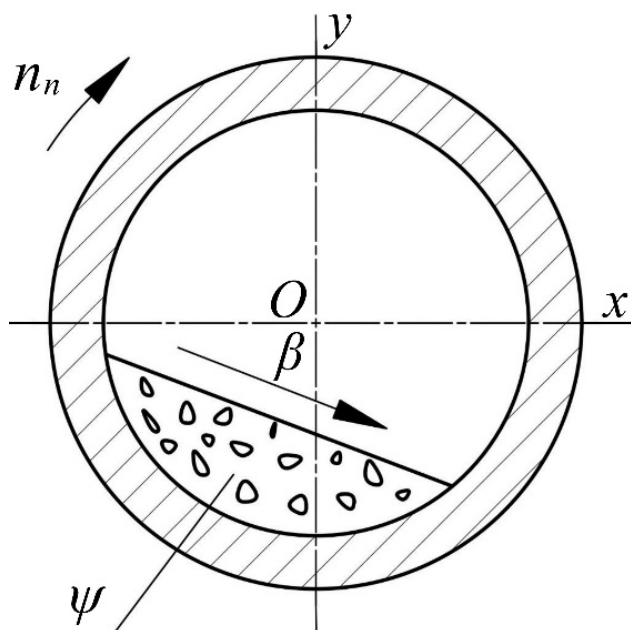


Рис. 1. Режим поперечного движения (скатывания) материала во вращающейся печи:

n_n – частота вращения печи; β – направление перемещения материала; ψ – коэффициент заполнения печи; Ox , Oy – оси печи

Чрезмерное увеличение количества материала в теплообменных устройствах повышает нагрузки на стенки корпуса, а также ухудшает качество теплообмена. Поэтому необходимо соблюдать баланс между конструктивными особенностями устройства и движением в нем материала, что можно организовать с использованием компьютерного моделирования в специализированных программных комплексах. При этом следует учитывать математические методы, которые в них реализованы, чтобы они удовлетворяли условиям моделирования. При исследовании материала в виде гранул используется численный метод дискретных элементов, предназначенный для моделирования поведения систем, состоящих из множества отдельных частиц или элементов, таких как горные породы, сыпучие среды и другие дискретные системы [8-9]. Где каждый элемент взаимодействует с другими элементами через контактные силы, трение, упругость и другие физические механизмы [10-11].

Предложено вращающуюся печь с габаритными размерами $\varnothing 4 \times 127$ м (где 4 м – диаметр печи, а 127 м – длина печи, с соотношением диаметра к длине 1:31,75) и производительностью до 29 т/ч оборудовать теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда (рис. 2). Данные печи оснащаются главным приводом мощностью 250 кВт и вспомогательным приводом мощностью 30 кВт. Частота вращения печи $n_n = 1,5$ об/мин (по часовой стрелки).

Целью работы является определение рациональных геометрических параметров теплообменных устройств в форме наклонного параллелепипеда, с использованием цифрового моделирования процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи в зоне декарбонизации клинкера.

Материал. 3D-модель вращающейся печи создана с помощью программного обеспечения *Siemens NX*, импортирована в специализированное программное обеспечение для моделирования процесса движения материала в поперечном сечении на участке печи в зоне, где проходит процесс декарбонизации клинкера [3]. Обозначенная зона печи на производстве планируется быть оборудованной теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда.

Произведен расчет участка корпуса печи с теплообменными устройствами длиной 2 м (длина одной обечайки) (табл. 1) (рис. 2), которая представлена в изометрии (рис. 2, а) и на виде спереди (рис. 2, б), с буквенными обозначениями размеров (табл. 1): L_m – толщина теплообменного устройства, мм; A – ширина теплообменного устройства, мм; H – физическая высота, мм; H_m – проекция высоты теплообменного устройства, на ось Oy , мм; α – угол наклона теплообменного устройства, град; n – количество теплообменных устройств. Геометрические размеры в ходе расчетов были выбраны $H_m = 900$; $A = 800$; $L_m = 700$. Количество n теплообменных устройств варьировалось от 4-х до 6-ти, угол наклона α варьировался от 30° до 50° .

Таблица 1

Параметры расчетов моделей для теплообменных устройств

Параметр	№ расчета									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
α	30°	35°	40°	45°	50°	30°	35°	40°	45°	50°

Материалы и методы.

В программном обеспечении перед моделированием были заданы расчетные параметры [12]. Условия моделирования:

1. технологические и геометрические:

- материал корпуса – сталь;
- наклон геометрической оси корпуса печи $3,5\%$;
- частота вращения корпуса печи $n_n = 1,5$ об/мин;

– коэффициент заполнения в зоне, где находятся теплообменные устройства составляет $\psi=10\%$;

– размер частиц $d=100$ мкм, которые перемещаются на дно корпуса.

2. Коэффициенты и числовые параметры [13]:

– клинкер: коэффициент Пуансона $\nu=0,3$; физическая плотность $\rho=3000$ кг/м³; модуль сдвига $G=10000$ МПа; коэффициент упругости 0,3; коэффициент статического трения 0,5; коэффициент трения качения 0,1;

– корпус и теплообменные устройства: коэффициент Пуансона $\nu=0,3$; физическая плотность $\rho=7800$ кг/м³; модуль сдвига $G=100$ МПа;

коэффициент упругости 0,4; коэффициент статического трения 0,2; коэффициент трения качения гранул по материалу корпуса 0,1.

Определены 3 зоны для отбора данных (рис. 3), в области которых осуществляется пересыпание материала, зоны расположены выше оси Ox , т.к. именно в зонах выше данной оси наблюдается выход материала из рассматриваемых теплообменных устройств (рис. 3) [14].

Расчет движения материала осуществляется с помощью специального программного обеспечения, основанного на методе дискретных элементов (DEM). Метод дискретных элементов – это численный метод расчета инженерного анализа, который позволяет моделировать взаимодействие множества частиц как друг с другом, так и с механическими системами.

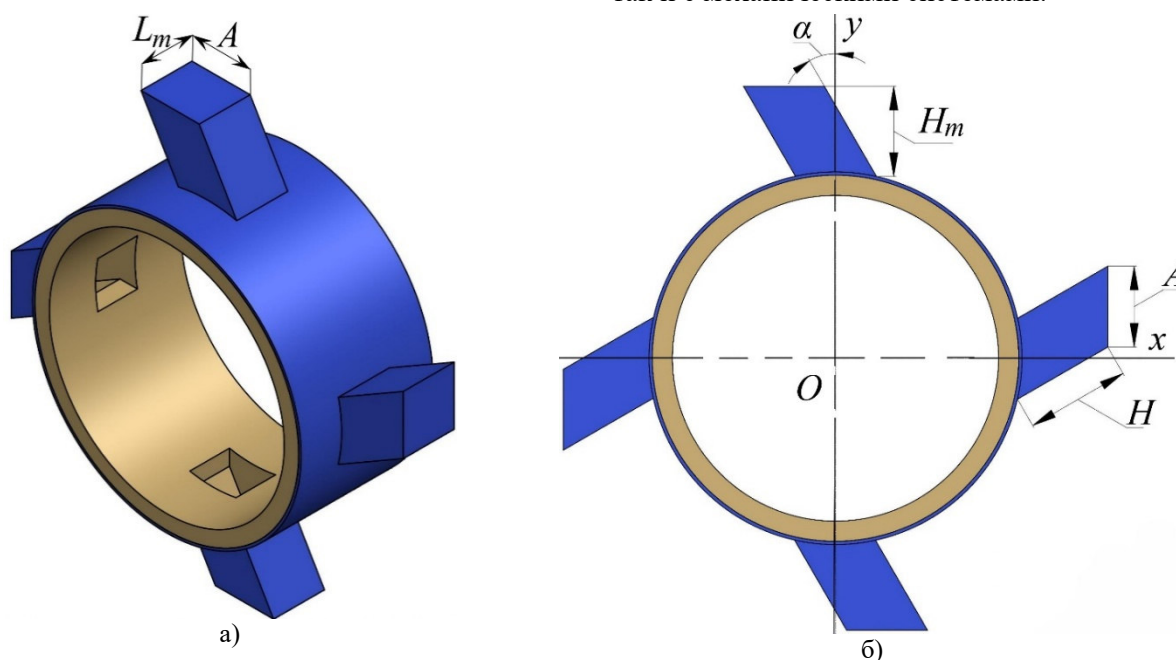


Рис. 2. Участок корпуса вращающейся печи с теплообменными устройствами, установленными в зоне декарбонизации: а – изометрия; б – вид спереди.

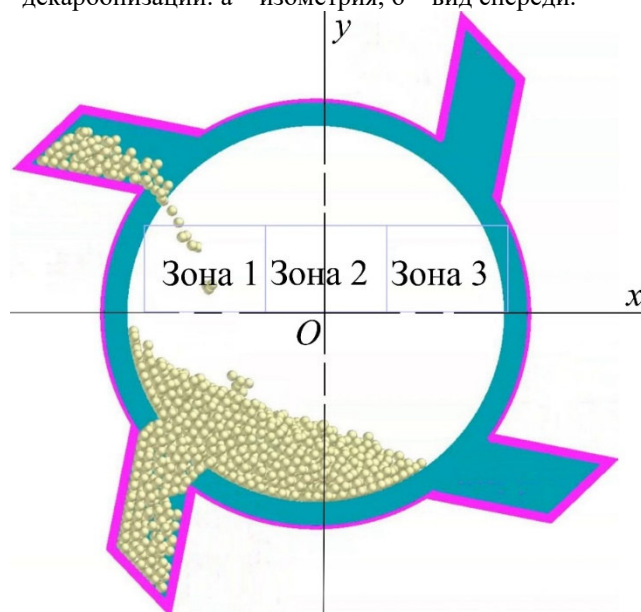


Рис. 3. Зоны для отбора данных

Методика. Получено несколько моделей для исследования процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи с внешними теплообменными устройствами в форме наклонного параллелепипеда [15]. Проведено исследование движения материала (рис. 4, а–д) при количестве теплообменных устройств $n=4$. Расчет и определение количества материала, проходящего через зоны 1–3 выполнялось при условии совершения корпусом печи одного полного оборота с варьированием параметров угла $\alpha=30^\circ\text{--}50^\circ$.

Материал в зонах 1 и 2 в моделях с геометрическими параметрами в таблице 1:

- по результатам расчета №1 (рис. 4, а) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1464 кг, через зону 2 проходит 72 кг, что в 19,7 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1538$ кг;

- по результатам расчета №2 (рис. 4, б) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1326 кг, через зону 2 проходит 237 кг, что в 5,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1563$ кг;

- по результатам расчета №3 (рис. 4, в) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1192 кг, через зону 2 проходит 385 кг, что в 3,1 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1577$ кг;

- по результатам расчета №4 (рис. 4, г) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 968 кг, через зону 2 проходит 584 кг, что в 1,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1552$ кг;

- по результатам расчета №5 (рис. 4, д) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 490 кг, через зону 2 проходит 586 кг, что в 0,8 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 1076$ кг.

Для анализа динамики движения материала, смоделированной методом дискретных элементов (DEM), была проведена серия расчетов. Наглядное представление о распределении материала в зависимости от варьируемого угла наклона α от 30° до 50° теплообменных устройств, при их количестве $n=4$ приведено на рисунке 4. Каждому углу наклона α соответствует своя конфигурация потоков материала, что наглядно иллюстрирует влияние данного параметра на процесс движения.

На серии изображений (рис.4, а–д) представлены результаты моделирования, соответствующие расчетам №1–5 из (табл. 1). Эти данные позволяют качественно и количественно оценить влияние геометрии теплообменных устройств на характер движения и заполнения материала в зонах 1, 2 и 3 поперечного сечения печи, что является ключевым для последующего качественного анализа.

Анализ движения материала в поперечном сечении печи при $n=4$ и изменении углов наклона теплообменных устройств в интервале $\alpha=30\text{--}50^\circ$ (табл. 1, №1–5, рис. 4, а–д) показал, что:

- в зону 3 материал не поступает;
- при углах наклона $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала изменяется $m_\Sigma = 1538, 1563, 1577$ кг, соответственно, при $\alpha=30^\circ$ материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 19,7 раза, при угле $\alpha=35^\circ$ больше в 5,6 раза, при угле $\alpha=40^\circ$ больше в 3,1 раза, для равномерного теплообмена желательно чтобы соотношение материала в зонах 1 и 2 была не более чем в 2 раза;

- при угле $\alpha=45^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 1552$ кг, при этом материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 1,6 раза;

- при угле $\alpha=50^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 1076$ кг, при этом материала в зоне 1 меньше, чем в зоне 2 в 0,8 раза;

- из-за того, что ширина выхода материала из теплообменных устройств с разными углами одинаковая, а проекция высоты теплообменного устройства *const*, то с увеличением угла происходит одновременное увеличение физической длины теплообменного устройства и сужение расстояния между его стенками, при толщине *const*, поэтому суммарная масса материала в моделях меняется: №1 – $m_\Sigma = 1538$ кг; №2 – $m_\Sigma = 1563$ кг; №3 – $m_\Sigma = 1577$ кг; №4 – $m_\Sigma = 1552$ кг; №5 – $m_\Sigma = 1076$ кг;

- минимальная суммарная масса двух зон $m_\Sigma = 1076$ кг получена при максимально равномерном распределении материала по зонам в модели №5 (табл. 1, №5, рис. 4, д) (зона 1 – 490 кг; зона 2 – 586 кг, разница в 0,8 раза);

- максимальная суммарная масса $m_\Sigma = 1577$ кг получена в модели №3 (табл. 1, №3, рис. 4, в) (зона 1 – 1192 кг, зона 2 – 385 кг, разница в 3,1 раза), разница в массах моделей №3 и №5 составляет $\Delta m_{\Sigma 3-5} = 500$ кг в 1,5 раза, поэтому наиболее целесообразно использовать модель №4 (табл. 1, №4, рис. 4, г) (зона 1 – 968 кг, зона 2 – 584 кг, разница в 1,6 раза), разница в количестве материала между расчетами моделей №3 и №4 составляет $\Delta m_{\Sigma 3-4} = 25$ кг, а разница

распределения материала между зонами в сравнении с расчетом модели №5 в 1,3 раза.

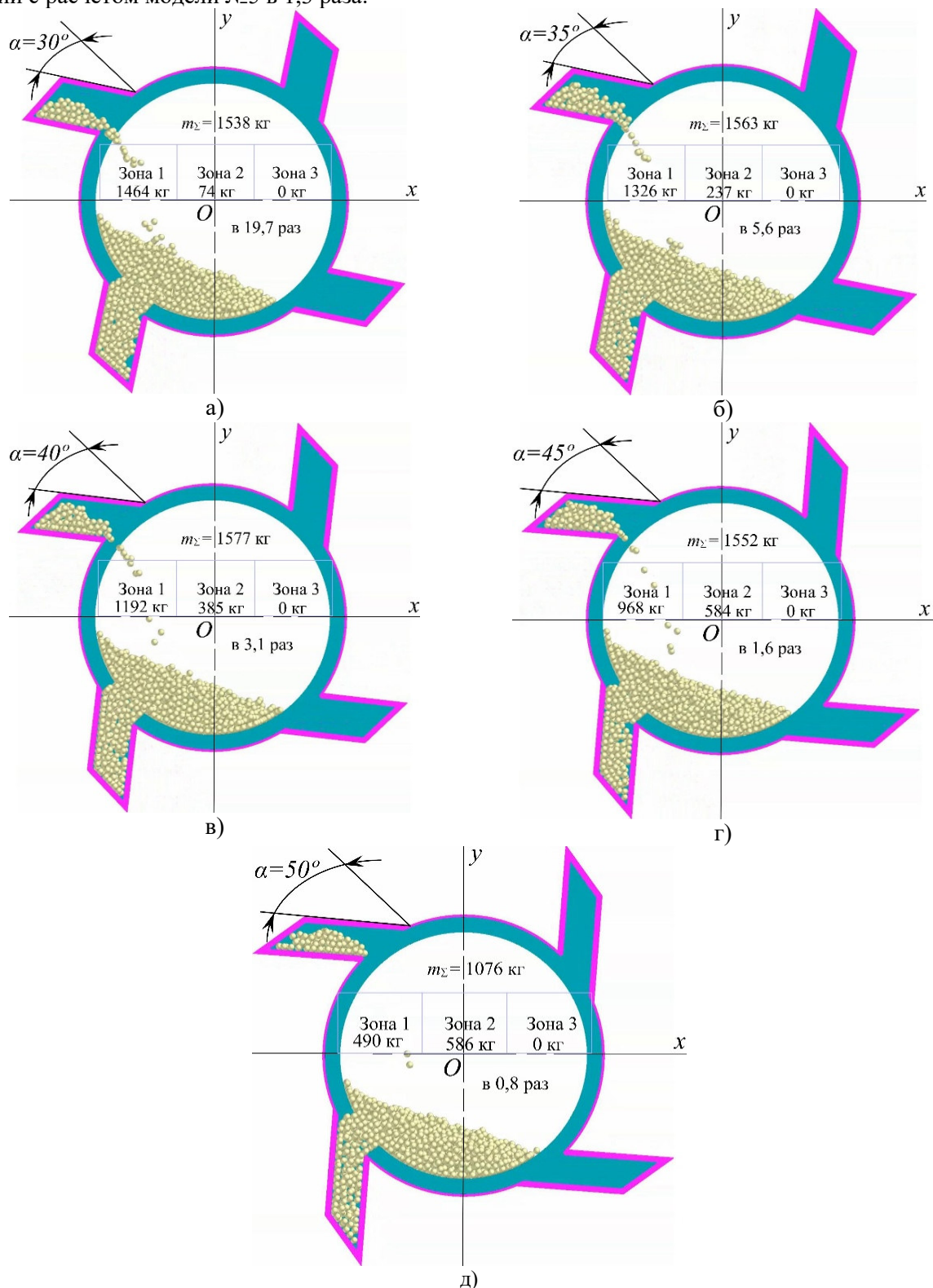


Рис. 4. Движение материала в поперечном сечении печи при $n=4$; $\alpha=30^\circ$ (а); $n=4$; $\alpha=35^\circ$ (б); $n=4$; $\alpha=40^\circ$ (в); $n=4$; $\alpha=45^\circ$ (г); $n=4$; $\alpha=50^\circ$ (д).

Проведено исследование движения материала (рис. 5, а-д) при количестве теплообменных устройств $n=6$. Расчет и определение количества

материала проходящего через зоны 1-3 выполнялось при условии совершения корпусом печи одного полного оборота с варьированием параметров угла $\alpha=30^\circ-50^\circ$

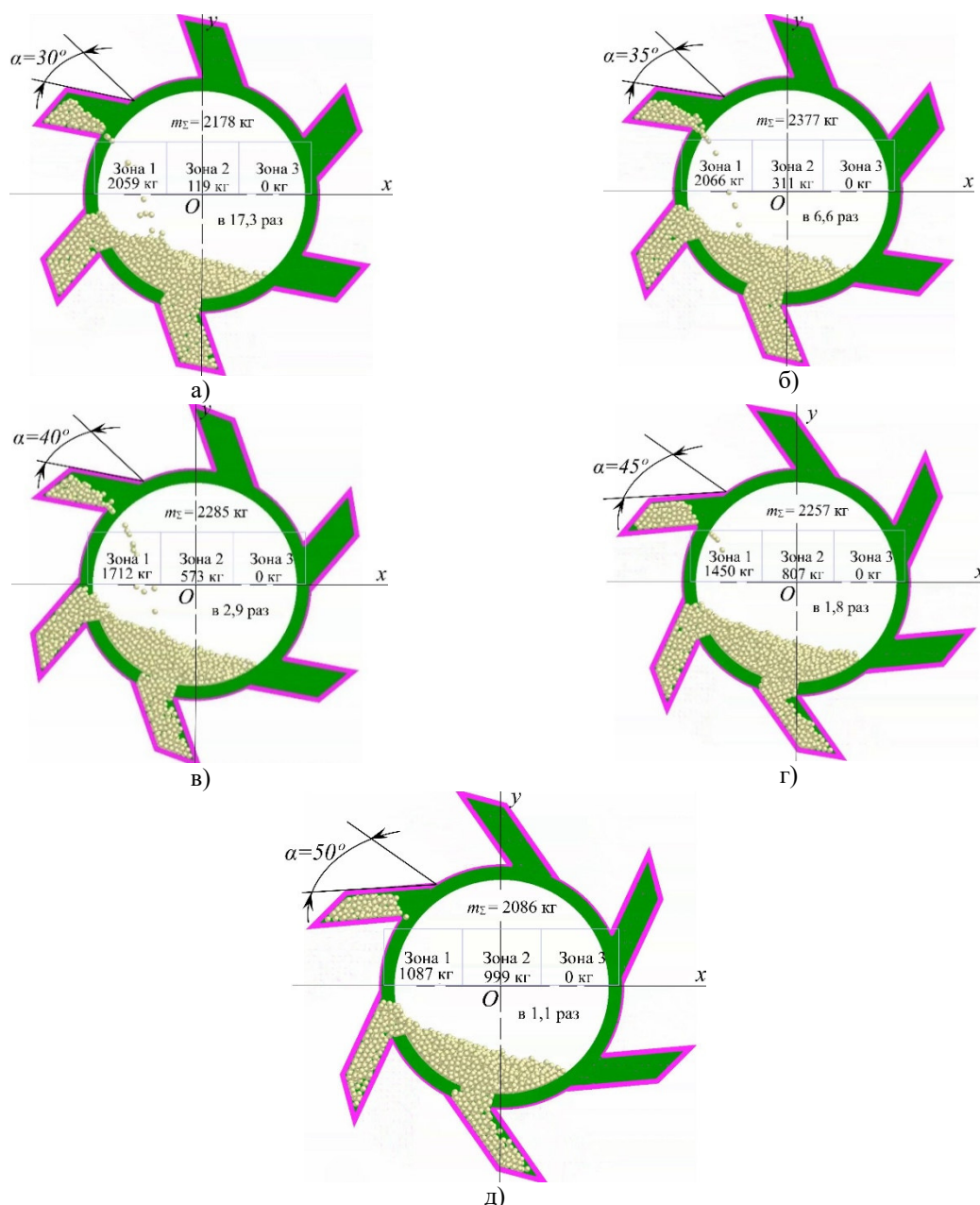


Рис. 5. Движение материала в поперечном сечении печи при $n=6$; $\alpha=30^\circ$ (а); $n=6$; $\alpha=35^\circ$ (б); $n=6$; $\alpha=40^\circ$ (в); $n=6$; $\alpha=45^\circ$ (г); $n=6$; $\alpha=50^\circ$ (д).

Материал в зонах 1 и 2 в моделях с геометрическими параметрами в таблице 1:

– по результатам расчета №1 (рис. 5, а) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 2059 кг, через зону 2 проходит 119 кг, что в 17,3 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2178$ кг;

– по результатам расчета №2 (рис. 5, б) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 2066 кг, через зону 2 проходит 311 кг, что в 6,6 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2377$ кг;

– по результатам расчета №3 (рис. 5, в) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1712 кг, через зону 2 проходит

573 кг, что в 2,9 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2285$ кг;

– по результатам расчета №4 (рис. 5, г) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1450 кг, через зону 2 проходит 807 кг, что в 1,8 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2257$ кг;

– по результатам расчета №5 (рис. 5, д) масса частиц материала, проходящего через зону 1 составляет 1087 кг, через зону 2 проходит 999 кг, что в 1,1 раза меньше. При этом суммарная масса материала, проходящего через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2086$ кг.

Анализ движения материала в поперечном сечении печи при $n=6$ и изменении углов наклона

теплообменных устройств в интервале $\alpha=30\text{--}50^\circ$ (табл. 1, №6–10, рис. 5, а–д) показал, что:

- в зону 3 материал не поступает;
- из-за того, что ширина выхода теплообменного устройства одинакова, то при увеличении угла увеличивается его длина и снижается расстояние между стенками, что изменяет площадь поперечного сечения теплообменного устройства;
- при углах наклона $\alpha=30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала $m_\Sigma = 2178, 2377, 2285$ кг, соответственно при $\alpha=30^\circ$ материала в зоне 1 больше материала, чем в зоне 2 в 17,3 раза, при угле $\alpha=35^\circ$ больше в 6,6 раза, при угле $\alpha=40^\circ$ больше в 2,9 раза;
- при угле $\alpha=45^\circ$ в зонах 1, 2 суммарная масса материала 2257 кг, при этом материала в зоне 1 больше, чем в зоне 2 в 1,8 раза, что допустимо, так как материал распределен более или менее равномерно между зонами 1, 2 и пересыпается на участке шириной 2 м;
- при угле наклона $\alpha=50^\circ$, в зонах 1, 2 суммарная масса материала равна 2086 кг, при этом материал во вращающейся печи в зоне 1 больше материала, чем в зоне 2 в 1,1 раза, но при данном угле наклона, теплообменное устройство пересыпает наименьшую массу материала;

– в случае с $n=6$ теплообменными устройствами так же, как и при $n=4$ наиболее целесообразно использовать угол их наклона $\alpha=45^\circ$, при этом в зоне 1 при выгрузке распределяется материал в 1,8 раза и 1,6 раза больше, чем во 2-ой зоне, соответственно.

Получены графики зависимости массы пересыпаемого материала в зонах 1 и 2, а также суммарной массы для четырех и шести теплообменных устройств (рис. 6). Установлено, что при количестве $n=4$ теплообменных устройств и угла наклона $\alpha=40^\circ$ наблюдается максимальное значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2, которое составляет $m_\Sigma = 1577$ кг. При этом при количестве $n=6$ и угле наклона $\alpha=35^\circ$ значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2 составляет $m_\Sigma = 2377$ кг, что в 1,7 раза больше. При данных параметрах разница материала, проходящая через зоны 1 и 2 между номерами расчетов, составляет 2,9 раза и 3,1 раза, соответственно. Максимально равномерное распределение материала показывает модель при угле наклона $\alpha=50^\circ$: для $n=6$ и $n=4$ разница распределения материала равна 1,1 и 0,8 раза, соответственно, но при этом суммарная масса меньше максимальной суммарной массы на 290 кг и на 500 кг, соответственно.

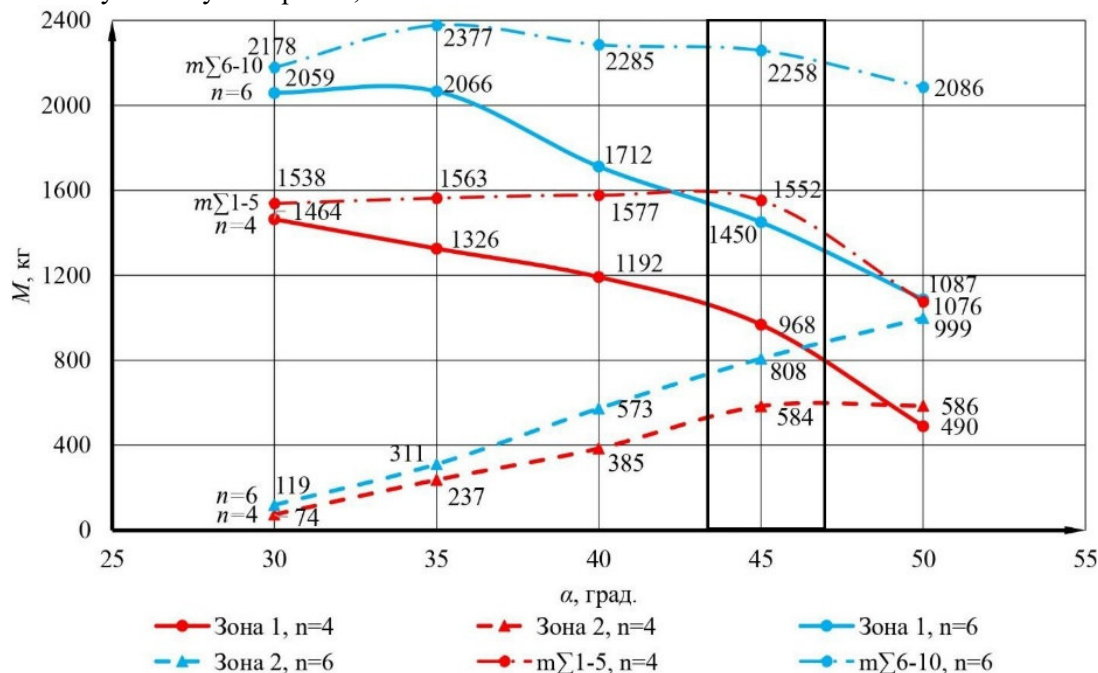


Рис. 6. График зависимости массы материала M , проходящей через зоны 1 и 2, от количества теплообменных устройств n и угла α наклона теплообменного устройства

Выводы. В ходе исследования влияния количества и угла наклона внешних теплообменных устройств в форме наклонного параллелепипеда на процесс движения материала в поперечном сечении вращающейся печи, установлено, что:

1. в зону 3 материал не поступает;

2. для равномерного теплообмена желательно чтобы соотношение материала в зонах 1 и 2 была не более чем в 2 раза;

3. с увеличением угла происходит одновременное увеличение физической длины теплообменного устройства и сужение расстояния между его стенками, при толщине $const$, поэтому суммарная масса материала в моделях меняется:

№1 – $m_{\Sigma} = 1538$ кг; №2 – $m_{\Sigma} = 1563$ кг; №3 – $m_{\Sigma} = 1577$ кг; №4 – $m_{\Sigma} = 1552$ кг; №5 – $m_{\Sigma} = 1076$ кг, это связано с тем, что ширина выхода материала из теплообменного устройства с разными углами одинаковая, а проекция высоты теплообменного устройства *const*;

4. при количестве $n=4$ теплообменных устройств и угла наклона $\alpha=40^\circ$ наблюдается максимальное значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2, которое составляет $m_{\Sigma} = 1577$ кг. При этом при количестве $n=6$ и угле наклона $\alpha=35^\circ$ значение суммарной массы, проходящей через зоны 1 и 2 составляет $m_{\Sigma} = 2377$ кг, что в 1,5 раза больше. При данных параметрах разница материала, проходящая через зоны 1 и 2 между номерами расчетов, составляет 2,9 раза и 3,1 раза, соответственно. Максимально равномерное распределение материала показывает модель при угле наклона $\alpha=50^\circ$: для $n=6$ и $n=4$ разница распределения материала равна 1,1 и 0,8 раза, соответственно, но при этом суммарная масса меньше максимальной суммарной массы на 290 кг и на 500 кг, соответственно;

5. увеличение количества теплообменных устройств требует добавление отверстий по периферии корпуса печи, что существенно влияет на прочность его конструкции. Ввиду этого дальнейшим направлением исследования является определение рационального количества теплообменных устройств путем расчета прочности корпуса вращающейся печи.

Благодарность. Работа выполнена с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors – A Review // International Journal of Engineering Innovation Research. 2014. Vol. 3. Issue 3. Pp. 342–345.
2. Julius L., Dusan D., Jan S. Effective use of rotary furnace shell heat // Acta Polytechnica. 2014. Vol. 54. №6. Pp.414–419. DOI: 10.14311/AP.2014.54.0414.
3. Cleary P.W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods // Minerals Engineering. 1998. Vol. 11. Pp. 1061–1080. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00093-4.
4. Baby-Jean R., Mungyeke B., Florian H. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 221. 119637. Pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

5. Xiaoyan L., Xuekui X., Weining W., Fabian H., Eckehard S. A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns // Powder Technology. 2016. Vol. 301. Pp. 1294–1298. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.005.

6. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 118. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.

7. Xiao Y.L., Eckehard S., Jochen M. Slumping–rolling transition of granular solids in rotary kilns // Chemical Engineering Science. 2005. Vol. 60. Issue 13. Pp. 3629–3636. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.020.

8. Wangchai S. Numerical simulation of the flow of agricultural seeds inside a rotary drum dryer by DEM // The 12th TSAE International Conference IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 301. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/301/1/012048.

9. Shengqiang J., Yixuan Y., Mingxue H., Chunyan D., Sisi L., Jingang L., Xiangwu X., Hao Z., Yuanqiang T. Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters // Powder Technology. 2019. Vol. 354. Pp. 377–391. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.005.

10. Jiang S., Ye Y., Tan Y., Liu S. Discrete element simulation of particle motion in ball mills based on similarity // Powder Technology. 2018. Vol. 335. Pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.012.

11. Khanal M., Morrison R. DEM simulation of abrasion of nonspherical particles in tumbling mill // Particulate Science and Technology. 2009. Vol. 27. Pp. 68–76. DOI: 10.1080/02726350802611853.

12. Serlya A., Juwari P. S., Renanto H. Implementation of a Mathematical Modelling of a Rotary Cement Kilns // IPTEK The Journal for Technology and Science. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.12962/j20882033.v3i1l.5548.

13. Jiang S., Li X., Zhang L., Tan Y., Peng R., Chen R. Discrete element simulation of SiC ceramic containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Issue 3. Pp. 3261–3276. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.099.

14. Agrawal A., Ghoshdastidar P.S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. Vol. 10. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.4039299.

15. Коновалов В.М., Перескок С.А., Петрова М.А., Образумов А.Н. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в производстве цемента // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №4. С. 176–181.

Информация об авторах

Анциферов Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Механическое оборудование». E-mail: anciferov.sergey@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Карачевцева Анастасия Владимировна, соискатель, конструктор Инжинирингового центра цифрового проектирования, аддитивных технологий и PLM-систем. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Фадин Юрий Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Механическое оборудование». E-mail: fadin.y@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Лозовая Светлана Юрьевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Механическое оборудование». E-mail: lozovaa.sy@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Мишин Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедры «Технология цемента и композиционных материалов». E-mail: mishinda.xtsm@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, улица Костюкова, 46.

Поступила 11.10.2025 г.

© Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.А., 2025

**Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Mishin D.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: anciferov.sergey@gmail.com*

MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL MOVEMENT IN THE CROSS SECTION OF A ROTATING FURNACE WITH HEAT EXCHANGE DEVICES

Abstract. The article is devoted to the study of the process of material movement in the cross-section of a rotating clinker kiln equipped with heat exchange devices in the form of an inclined parallelepiped, which is relevant. To optimize the geometric parameters of the heat exchange devices, digital modeling was carried out in specialized software systems, which reduced the design time, and also made it possible to study in detail the distribution of material in the furnace zones. Simulations were performed in the cross section of the furnace in the decarbonization zone for four and six heat exchangers with tilt angles from 30° to 50° in 5° increments. The simulation results showed that it is most advisable to use the angle of inclination $\alpha = 45^\circ$, while in zone 1, 2 times and 1.6 times more material is distributed during unloading, than in the 2nd zone, in the case of six and four heat exchangers, respectively. In the zone under consideration, there is a mass of material about 5-10% less than the maximum, corresponding to an angle of inclination of 40° for both cases under consideration. It is advisable to use four heat exchange devices, since with an increase in the holes in the housing, its strength decreases, which requires additional research.

Keywords: rotary kiln, heat exchange devices, digital modeling, DEM (Discrete element method), clinker firing, heat exchange.

REFERENCES

1. Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors – A Review. International Journal of Engineering Innovation Research. Vol. 3. Issue 3. 2014. Pp. 342–345.
2. Julius L., Dusan D., Jan S. Effective use of rotary furnace shell heat. Acta Polytechnica. Vol. 54. No 6. 2014. Pp. 414–419. DOI: 0.14311/AP.2014.54.0414.
3. Cleary P.W. Predicting charge motion, power draw, segregation and wear in ball mills using discrete element methods. Minerals Engineering.

Vol. 11. 1998. Pp. 1061–1080. DOI: 10.1016/S0892-6875(98)00093-4.

4. Baby-Jean R., Mungyeke B., Florian Huchet. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. Applied Thermal Engineering. Vol. 221. 2023. 119637. Pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

5. Xiaoyan L., Xuekui X., Weining W., Fabian H., Eckehard S. A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns. Powder Technology. Vol. 301. 2016. Pp. 1294–1298. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.08.005.

6. Janati K.I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants. Engineering Failure

Analysis. Vol. 118. 2020. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104896.

7. Xiao Y.L., Eckehard S., Jochen M. Slumping–rolling transition of granular solids in rotary kilns. Chemical Engineering Science. Vol. 60. Issue 13. 2005. Pp. 3629–3636. DOI: 10.1016/j.ces.2005.02.020.

8. Wangchai S. Numerical simulation of the flow of agricultural seeds inside a rotary drum dryer by DEM. The 12th TSAE International Conference IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 301. 2019. Pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/301/1/012048.

9. Shengqiang J., Yixuan Y., Mingxue H., Chunyan D., Sisi L., Jingang L., Xiangwu X., Hao Z., Yuanqiang T. Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters. Powder Technology. Vol. 354. 2019. Pp. 377–391. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.005.

10. Jiang S., Ye Y., Tan Y., Liu S. Discrete element simulation of particle motion in ball mills based on similarity. Powder Technology. Vol. 335. 2018. Pp. 91–102. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.05.012.

11. Khanal M., Morrison R. DEM simulation of abrasion of nonspherical particles in tumbling mill.

Particulate Science and Technology. Vol. 27. 2009. Pp. 68–76. DOI: 10.1080/02726350802611853.

12. Serlya A., Juwari P.S., Renanto H. Implementation of a Mathematical Modelling of a Rotary Cement Kilns. IPTEK The Journal for Technology and Science. 2019. Pp. 1–10. DOI: 10.12962/j20882033.v31i1.5548.

13. Jiang S., Li X., Zhang L., Tan Y., Peng R., Chen R. Discrete element simulation of SiC ceramic containing a single pre-existing flaw under uniaxial compression. Ceramics International. Vol. 44. Issue 3. 2018. Pp. 3261–3276. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.11.099.

14. Agrawal A., Ghoshdastidar P.S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. Vol. 10. 2018. Pp. 1–12. DOI: 10.1115/1.4039299.

15. Kononov V.M., Pereskok S.A., Petrova M.A., Obrazumov A.N. Increase of efficiency of heatmass-exchanged processes in cement production [Povyshenie effektivnosti teplomassoobmennyyh processov v proizvodstve cementa]. Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov. 2016. No. 4. Pp. 176–181. (rus)

Information about the authors

Antsiferov, Sergey I. PhD, associate professor, head of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: antsiferov.sergey@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Karachevtseva, Anastasia V. Applicant, designer of the Engineering center for digital design, additive technologies and PLM-systems. E-mail: karachevtseva.anastasiia@gmail.com. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Fadin, Yuri M. PhD, Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: fadin.y@mail.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Lozovaya, Svetlana Y. DSc, Professor of the Mechanical Equipment Department. E-mail: lozovaa.sy@bstu.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Mishin, Dmitry A. PhD, Associate professor, head of the Department Technology of cement and composite materials. E-mail: mishinda.xtmsm@yandex.ru. Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova street, 46.

Received 11.10.2025

Для цитирования:

Анциферов С.И., Карачевцева А.В., Фадин Ю.М., Лозовая С.Ю., Мишин Д.А. Моделирование процесса движения материала в поперечном сечении вращающейся печи с теплообменными устройствами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 124–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-124-133

For citation:

Antsiferov S.I., Karachevtseva A.V., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Mishin D.A. Modeling of the process of material movement in the cross section of a rotating furnace with heat exchange devices. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 124–133. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-124-133