

УДК 62-231.228

д.т.н. Еронько С. П.,  
к.т.н. Ткачев М. Ю.,  
д.т.н. Пономаренко А. Г.  
(ДонГТУ, г. Донецк, ДНР)

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НОВОЙ СИСТЕМЫ ВЫГРУЗКИ ШАХТНОЙ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ

*Рассмотрены конструктивная схема и методика расчёта технологических нагрузок новой системы выгрузки шахтной печи для обжига известки, а также результаты экспериментальной проверки правильности принятых технических решений и приближенной оценки значений силовых параметров её электромеханического привода.*

**Ключевые слова:** кусковая известка, обжиг, шахтная печь, устройство выгрузки, электромеханический привод.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** При производстве чугуна и стали в качестве флюса — материала, вводимого в шихту с целью понижения температуры плавления пустой породы, ошлакования золы кокса и обеспечения высокой жидкоподвижности и серопоглотительной способности шлака, — как известно, используют известку, получаемую путём обжига известняка в барабанных и шахтных печах [1, 2]. В настоящее время всё большее распространение получают шахтные обжиговые печи с суточной производительностью 145...160 т кусковой известки. Одним из важнейших структурных механизмов печей данного типа является система выгрузки готового продукта, от надёжности и технических возможностей которой в значительной мере зависит стабильность функционирования печи в заданном технологическом режиме. К главным требованиям, предъявляемым к выгрузочному устройству, относят высокую степень равномерности выдачи в единицу времени объёма кускового материала, возможность регулирования в заданных пределах интенсивности разгрузки печи, а также способность рабочих органов разрушать периодически образующуюся в шахте печи спёкшуюся массу, нарушающую нормальный ход процесса выгрузки обожжённой известки. Практика эксплуатации известных систем разгрузки шахтных обжиго-

вых печей свидетельствует о том, что большинство из них не отвечает в полной мере вышеперечисленным требованиям, а это предопределяет необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на совершенствование существующих разгрузочных устройств [3–5].

**Постановка задачи.** Целью данной работы являлось создание усовершенствованной системы выгрузки шахтной обжиговой печи, эффективно функционирующей в неблагоприятных производственных условиях. Это потребовало выбора новой конструктивной схемы системы, получения теоретических зависимостей, позволяющих выполнить предварительную оценку энергосиловых параметров её привода, а также проведения модельных исследований для проверки правильности принятых технических решений и адекватности полученных математических выражений, описывающих силовое взаимодействие элементов исследуемого объекта.

**Изложение материала и его результаты.** С учётом результатов выполненного сопоставительного анализа достоинств и недостатков известных отечественных и зарубежных аналогов и имеющегося опыта проектирования систем выгрузки известки из шахтных обжиговых печей [6, 7] авторами данной публикации был предложен усовершенствованный вариант такой системы, схематично представленный на рисунке 1.

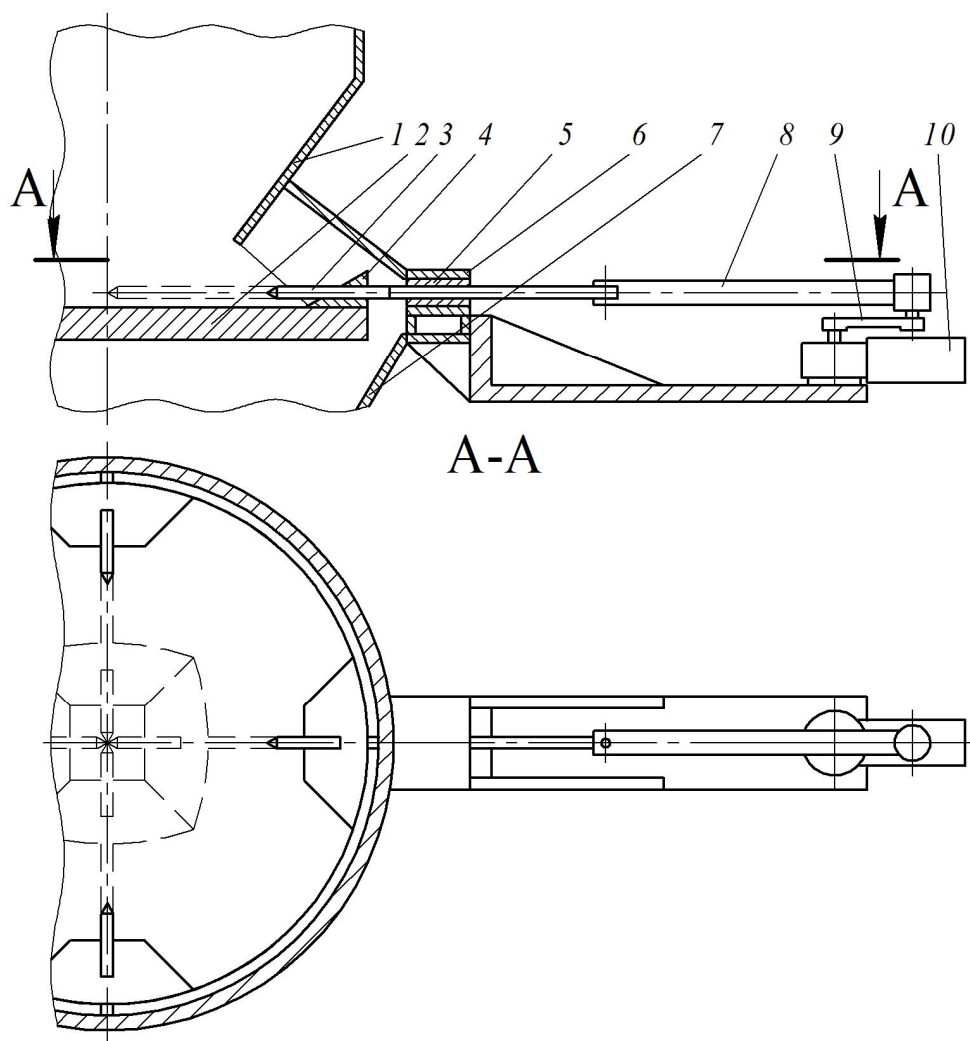


Рисунок 1 Конструктивная схема предложенного механизма системы выгрузки извести из шахтной обжиговой печи

Система состоит из четырёх независимых механизмов, равномерно размещённых по периметру неподвижного круглого стола печи и снабжённых индивидуальным электромеханическим приводом. Каждый из четырёх механизмов включает самотормозящийся червячный мотор-редуктор 10 с регулируемой частотой вращения выходного вала, на котором закреплён кривошип 9, шарнирно связанный с одним из концов шатуна 8. Второй конец шатуна посредством оси соединён с ползуном, состоящим из долота 3 круглого сечения, имеющего возможность возвратно-поступательного перемещения во втулке 5 направляющей опоры 6 и жёстко связанного с клиновид-

ным сегментом 4, расположенным на неподвижном столе 2 круглой формы, смонтированном с зазором относительно конической горловины 1 корпуса печи над коническим коллектором 7.

Данный механизм работает следующим образом. После заполнения обожжённой известью проёма между срезом конической горловины 1 корпуса печи и её круглым столом 2 запускают мотор-редуктор 10, который приводит во вращение в горизонтальной плоскости закреплённый на его выходном валу кривошип 9. Благодаря кривошипу, шарнирно связанному с шатуном 8, крутящий момент, развиваемый мотором-редуктором, преобразуется в усилие,

передаваемое долотом 3 и связанным с ним клиновидным сегментом 4 к центру круглого пода 2. При этом заострённым концом долота разрушается (при наличии) спёкшаяся часть материала, образующаяся вблизи вертикальной оси шахты, а его кусковая фракция пересыпается через верхний срез клиновидного сегмента 4 и под углом естественного откоса располагается за ним на краю стола 2. Во время обратного хода кривошипно-шатунного механизма клиновидный сегмент 4 своей массивной частью сдвигает находящийся за ним слой материала к кольцевой щели, через которую он ссыпается в конический коллектор 7.

Для выполнения расчётов в ходе конструирования промышленного образца предложенной системы выгрузки извести из шахтной печи необходима предварительная оценка энергосиловых параметров её привода. Для её выполнения использовали расчётные схемы, приведённые на рисунках 2 и 3. При этом в первом приближении силы трения в шарнирах механизма не учитывали.

Во время поступательного движения относительно поверхности стола на сегмент действуют: его сила тяжести  $P_c$ ; сила трения  $F_{тр}$  между опорной поверхностью сегмента и поверхностью стола; сила сопротивления, вызванная боковым давлением кускового материала на скошенную часть сегмента, внедряющуюся в толщу материала при движении к центру стола,  $F_{ск}$ ; сила сопротивления, возникающая при сдвиге слоя материала тыльной частью сегмента к краю разгрузочного стола,  $F_{сд}$ .

Сила тяжести сегмента:

$$P_c = V_c \rho_{мс},$$

где  $V_c$  — объём тела сегмента;

$\rho_{мс}$  — плотность материала сегмента.

Сила трения между контактными поверхностями сегмента и круглого стола:

$$F_{тр} = (P_c + \rho_{км} g h_{км} S_{км}) \mu,$$

где  $\rho_{км}$  — насыпная плотность кускового материала;

$h_{км}$  — высота столба кускового материала над телом сегмента;

$S_{км}$  — площадь поверхности сегмента, на которую давит столб материала;

$\mu$  — коэффициент трения скольжения между контактными поверхностями сегмента и стола, равный 0,15.

Сила, вызванная действием бокового давления столба материала на скошенную поверхность сегмента при его движении к центру стола:

$$F_{ск} = S_{ск} \rho_{км} g h_{км} k_b,$$

где  $S_{ск}$  — площадь вертикальной проекции скошенной поверхности сегмента;

$k_b$  — коэффициент бокового давления кускового материала, равный 0,3.

Сила сопротивления, преодолеваемая при сдвиге слоя кускового материала тыльной частью сегмента к краю круглого стола:

$$F_{сд} = S_{сд} \tau_{сд},$$

где  $S_{сд}$  — текущее значение площади поверхности сдвигаемого слоя кускового материала;

$\tau_{сд}$  — напряжение сдвига слоя материала.

Направление действия и точки приложения указанных сил при движении сегмента к центру круглого стола и к его краю показаны соответственно на рисунках 2, а и 2, б, а текущие положения сегмента в плане относительно шахты печи — на рисунке 3.

Общая сила сопротивления перемещению сегмента при его движении к центру круглого стола и обратно:

$$F_o = F_{тр} + F_{ск} \text{ и } F_o = F_{тр} - F_{ск} + F_{сд}.$$

Тогда крутящий момент, действующий на выходной вал мотора-редуктора

$$M_{кр} = \frac{F_o}{\cos \alpha_i} O A \cos \beta_i.$$

Мощность мотора-редуктора при статической нагрузке:

$$N = \frac{M_{кр} \omega_{кр}}{\eta_o},$$

где  $M_{кр}$  — максимальное значение крутящего момента;

$\omega_{кр}$  — угловая скорость кривошипа;

$\eta_o$  — общий КПД механизма.

$$\omega_{кр} = \frac{v_c}{OA}.$$

Здесь  $v_c$  — скорость поступательного движения сегмента.

С использованием полученных зависимостей рассчитали параметры привода системы выгрузки обжиговой печи производительностью 160 т в сутки, используя следующие исходные данные:  $P_c = 800$  Н;  $h_{км} = 20$  м;  $v_c = 0,08$  м/с;  $OA = 0,2$  м;  $\omega_{кр} = 0,4$  рад/с;  $\rho_{км} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $S_{ск} = 0,05$  м<sup>2</sup>;  $S_{сд} = 0,36$  м<sup>2</sup>;  $\tau_{сд} = 1600$  Па.

Результаты расчёта приведены в таблице.

Тогда мощность мотора-редуктора составит

$$N = \frac{1115 \cdot 0,4}{0,8} = 557 \text{ Вт} \approx 0,6 \text{ кВт}.$$

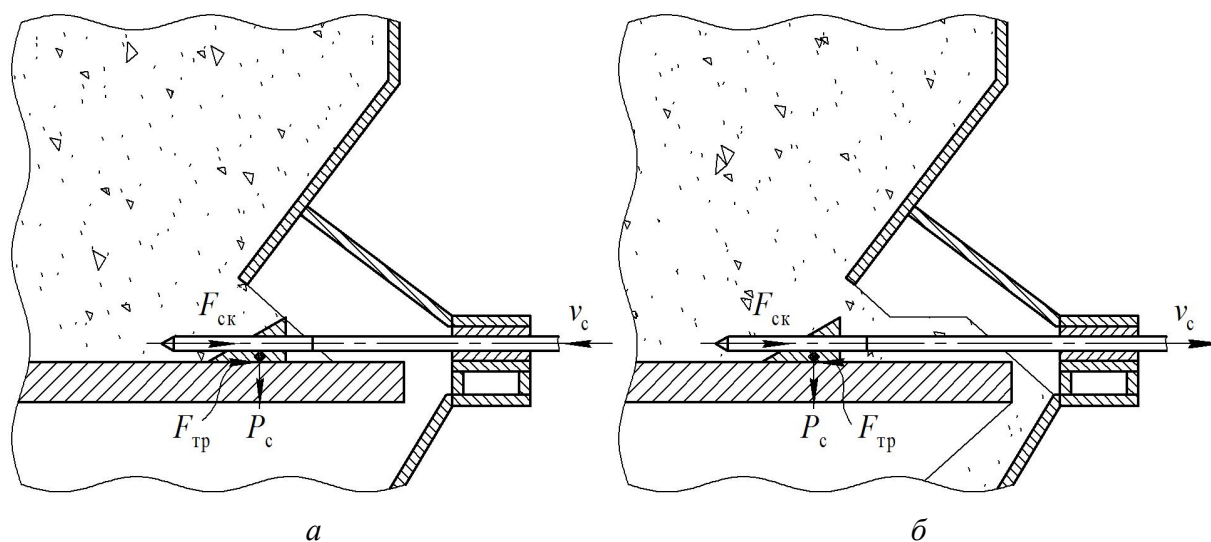


Рисунок 2 Направление действия и точки приложения указанных сил при движении сегмента к центру круглого стола и к его краю

Таблица

Оценочные расчётные значения технологических нагрузок, действующих на механизм выгрузки в его текущих положениях (рис. 3)

Положение механизма	Учитываемые параметры						
	$F_{тр}$ , Н	$F_{ск}$ , Н	$F_{сд}$ , Н	$F_o$ , Н	$\alpha_i$ , град	$\beta_i$ , град	$M_{кр}$ , Н·м
1	120	0	0	120	0	0	0
2	120	0	0	120	14	43	20
3	3120	2700	0	5820	16	23	1115
4	3120	2700	0	5820	0	0	0
5	3120	2700	600	1020	0	0	0
6	3120	2000	380	1500	16	16	380
7	120	0	210	203	14	43	33
8	120	0	0	120	0	0	0

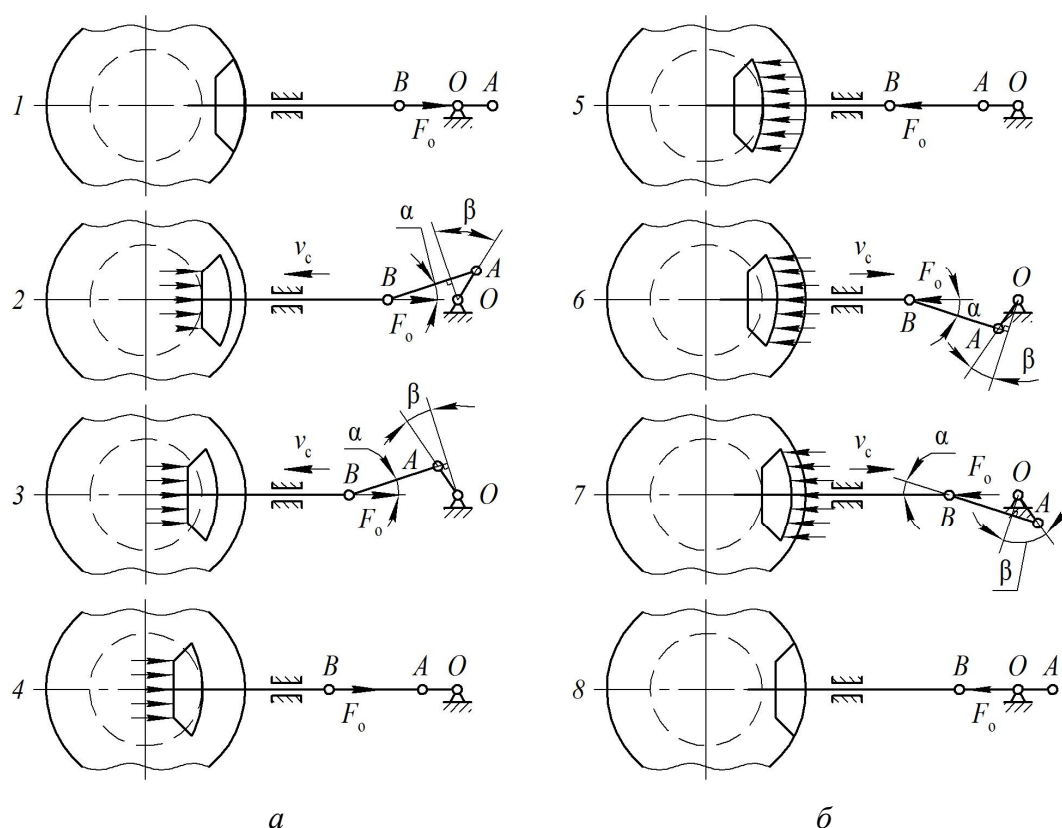


Рисунок 3 Текущие положения сегмента в плане относительно шахты печи

Предварительно полученное значение мощности позволяет в дальнейшем рассчитать размеры и массы структурных звеньев рычажного механизма, которые будут необходимы для выполнения уточнённого расчёта его параметров с учётом динамических сил.

Проверку правильности технического решения, принятого при разработке усовершенствованной системы выгрузки извести из шахтной обжиговой печи, и корректности полученных расчётных зависимостей для определения энергосиловых параметров её привода выполнили с использованием метода физического моделирования. С этой целью спроектировали и изготовили в масштабе 1:20 действующую модель 160-тонной обжиговой печи, снабжённую предложенной системой выгрузки кускового материала.

Физическое моделирование процесса выгрузки обожжённой извести из шахтной печи с использованием предложенной раз-

грузочной системы проводили в следующем порядке. В модель засыпали отсев фракцией от 0,5 до 3 мм, что соответствовало для натурального образца печи кускам извести с поперечными размерами 10–60 мм. Для имитации крупных кусков в виде спёкшейся массы предварительно из дроблёной извести с использованием связующего вещества (разбавленный водой клей ПВА) получили комки произвольной формы, имевшие поперечный размер от 15 до 25 мм. После затвердевания и приобретения прочности эти образцы помещали в слой измельчённой извести по всей высоте шахты модели печи. При полностью заполненной шахте модели печи запускали привод механизма её системы выгрузки и выполняли визуальный контроль движения рабочих узлов выгрузочной системы и разгружаемого материала относительно круглого стола (рис. 4). В результате наблюдений удалось установить, что сыпучая известь при движении рабочих элементов от

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

центра стола к его периферии равномерно сыпалась через щелевые зазоры в приёмный конический коллектор. Когда рабочий элемент выгрузочной системы двигался к центру стола, связанное с ними долото оказывало силовое воздействие на крупные куски материала, что обеспечивало их разрушение и стабилизировало процесс выдачи зернистой среды из модели печи.

Второй этап модельных исследований включал эксперименты, связанные с определением момента сопротивления, дейст-

вующего на вал кривошипа при работе выгрузочной системы. Для этого между выходным валом мотора-редуктора и валом кривошипа устанавливали тензорезисторный преобразователь, как показано на рисунке 5. В таком варианте преобразователь выполнял функцию муфты и при включении в контрольно-измерительный комплекс позволял в режиме реального времени осуществлять фиксацию значений крутящего момента, развиваемого во время работы электромеханическим приводом.



а



б

Рисунок 4 Текущие положения рабочего элемента с долотом во время выгрузки сыпучего материала из модели печи: а — движение к центру стола; б — движение к периферии стола



Рисунок 5 Место установки тензорезисторного преобразователя во время проведения контрольных измерений момента сопротивления, преодолеваемого приводом модели выгрузочного устройства

Контроль крутящего момента, передаваемого от привода к валу кривошипа, осуществляли в следующей последовательности. После предварительно выполненной тарировки тензорезисторный преобразователь подсоединяли к сети контрольно-измерительного комплекса, включавшего усилитель переменного тока, аналого-цифровой преобразователь и ЭВМ. Осуществив балансировку моста сопротивлений тензорезисторного преобразователя, включали в режим записи измерительную систему и запускали привод кривошипно-шатунного механизма. Во время функционирования системы выгрузки модели шахтной печи осуществляли наблюдение за процессом выдачи сыпучего материала в приёмный конический коллектор в течение одной минуты, после чего останавливали мотор-редуктор. Обработанную с использованием специальной прикладной программы зарегистрированную информацию выводили на экран монитора в виде визуального отображения зафиксированного сигнала, характерный вид которого показан на рисунке 6.

На полученных записях чётко отображался характер изменения нагрузки на

привод механизма выгрузки модели шахтной печи при силовом взаимодействии его рабочего органа с кусками выгружаемого материала.

После завершения серии измерений осуществили обработку зарегистрированных сигналов, для чего с использованием графика тарировочной зависимости выполнили пересчёт значений амплитуды сигнала, выраженных в кодах АЦП, в значения крутящего момента. Полученные данные сопоставили с результатами ранее выполненного для модели устройства выгрузки печи расчёта статической нагрузки, действующей на него во время работы (рис. 7).

Полученная информация свидетельствует о работоспособности предложенной усовершенствованной системы выгрузки из шахтной обжиговой печи.

Зафиксированное расхождение между расчётными и экспериментальными данными, достигавшее 20 %, связано с тем, что при выполнении оценочного силового расчёта привода модели механизма выгрузки печи сопротивление в его шарнирных соединениях не учитывали.

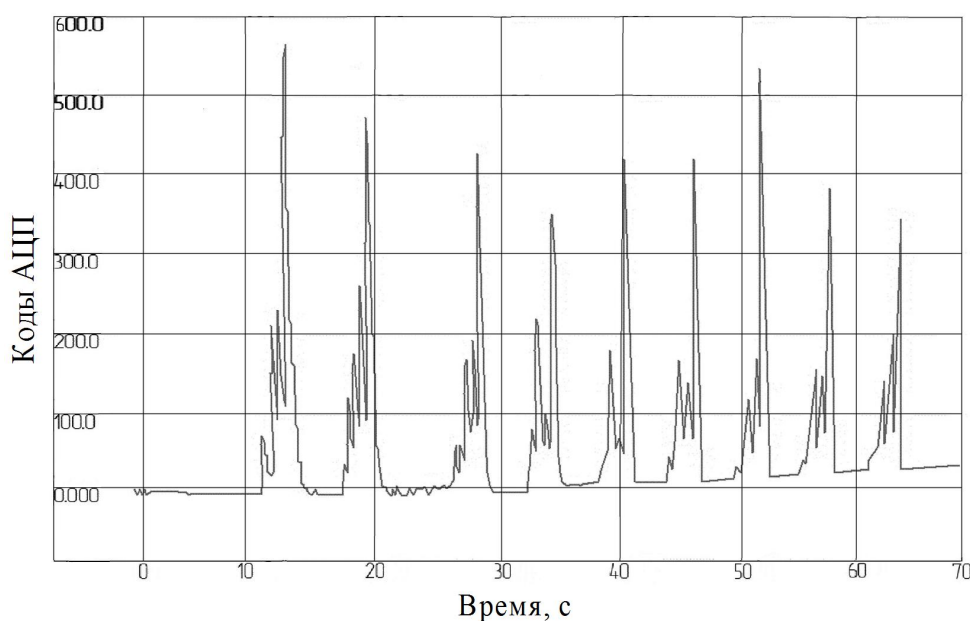


Рисунок 6 Характерный вид зарегистрированного сигнала при контроле крутящего момента, развиваемого приводным мотором-редуктором

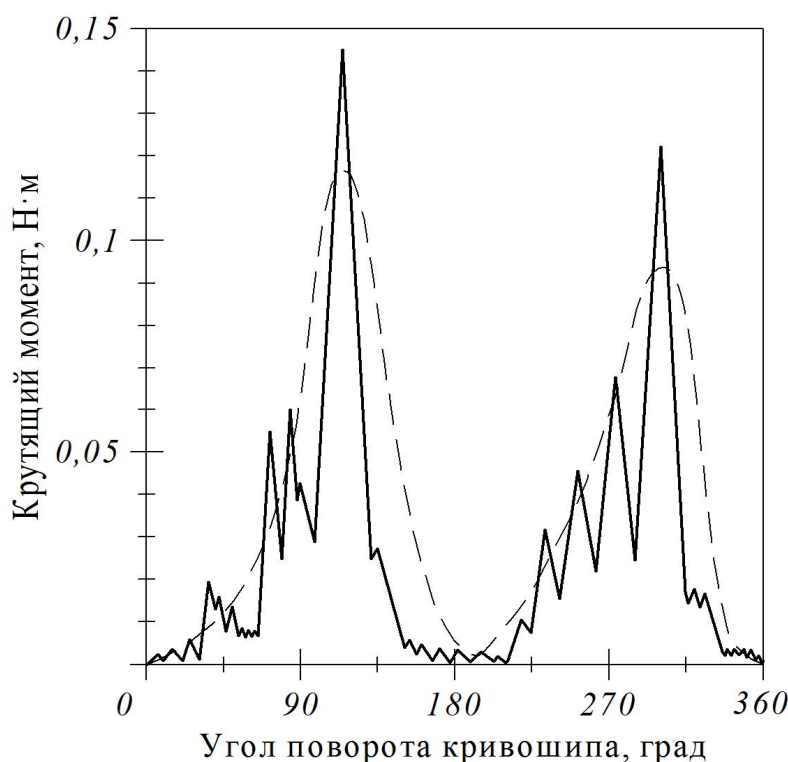


Рисунок 7 Графики изменения крутящего момента, развиваемого приводом модели системы выгрузки печи, построенные по расчётным данным (штриховая линия) и результатам измерений (непрерывная линия)

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, полученные результаты проведённых исследований являются исходной информацией для выполнения уточнённого расчёта натурного об-

разца системы выгрузки шахтной печи, которая может быть рекомендована к промышленному использованию с последующими конструктивными доработками в ходе её работы в производственных условиях.

#### Библиографический список

1. Монастырев, А. В. Производство извести [Текст] / А. В. Монастырев. — М. : Высшая школа, 1978. — 225 с.
2. Монастырев, А. В. Печи для производства извести [Текст] : справочник / А. В. Монастырев, А. В. Александров. — М. : Металлургия, 1979. — 232 с.
3. Совершенствование производства извести в шахтных печах [Текст] / И. В. Питак [и др.] // Технологический аудит и резервы производства. — 2014. — № 1. — С. 59–63.
4. Автоматизация технологического процесса выгрузки и транспортировки обожжённой извести [Текст] / А. С. Ефремов [и др.] // Вестник Костромского государственного технологического университета. — 2015. — № 2 (35). — С. 61–64.
5. Опыт технического перевооружения и освоения режимов работы печи RTF для обжига известняка [Текст] / В. В. Мадисон [и др.] // Сталь. — 2015. — № 3. — С. 64–70.
6. Пат. 2623402 Российская Федерация, МПК F27B1/20. Устройство для разгрузки шахтной известково-газовой печи / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, В. А. Скляр, А. В. Сазонов, А. В. Парахин, О. И. Малахова // Бюл. изобретений. — 2017. — № 18.
7. Расчет и конструирование эффективной системы выгрузки извести из шахтной обжиговой печи / С. П. Еронько [и др.] // Metallurg. — 2018. — № 7. — С. 38–43.



8. Разработка гидравлического привода системы выгрузки из шахтной обжиговой печи / С. П. Еронько [и др.] // *Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 5-й Межд. науч.-практ. конф. в 6-ти т. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов.* — Донецк : ДонНТУ, 2019. — С. 34–39.

© Еронько С. П.

© Ткачѳв М. Ю.

© Пономаренко А. Г.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым А. Ю., д.т.н., проф. каф. ОМД ДонНТУ Яковченко А. В.*

*Статья поступила в редакцию 18.11.19.*

**д.т.н. Єронько С. П., к.т.н. Ткачов М. Ю., д.т.н. Пономаренко О. Г. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)**

### **РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ТА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НОВОЇ СИСТЕМИ ВИВАНТАЖЕННЯ ШАХТНОЇ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ**

*Розглянуто конструктивну схему та методику розрахунку технологічних навантажень нової системи вивантаження шахтної печі для випалювання вапна, а також результати експериментальної перевірки правильності прийнятих технічних рішень і наближеної оцінки значень силових параметрів її електромеханічного привода.*

**Ключові слова:** *кускове вапно, випалювання, шахтна піч, пристрій вивантаження, електромеханічний привод.*

**Doctor of Technical Sciences Eron'ko S. P., PhD in Engineering Tkachov M. Yu., Doctor of Technical Sciences Ponomarenko A. G. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

### **DESIGN ENGINEERING AND ASSESSMENT OF PROCESS LOADS OF THE NEW UNLOADING SYSTEM OF THE ROASTING SHAFT FURNACE**

*There have been studied the construction arrangement and design procedure of the new unloading system of the shaft furnace for lime roasting as well as the results of experimental validation of accuracy of made engineering solution and approximate value of power factors of its electromechanical drive.*

**Key words:** *lump lime, roasting, shaft furnace, unloader, electromechanical drive.*