

Гончаров Андрей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ
МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГРЕССИВНЫХ
ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени.

кандидата технических наук



Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель:

Утенков Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлорежущих станков МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Официальные оппоненты:

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, НИТУ МИСИС.

Ривкин Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков МГТУ, «Станкин».

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Защита состоится «__»_____2025г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д24.2.331.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу 105005 Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Телефон для справок: 8 (499) 263-66-33*36-28

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направить на имя ученого секретаря диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан «__»_____2025г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Богданов
Александр
Владимирович

Актуальность работы.

С учетом принятых правительством РФ решений об инновационном развитии промышленности вопросы технического обслуживания производственного оборудования сегодня особенно актуальны. При значительных объемах строительства в стране обеспечение надежной и бесперебойной эксплуатации вращающихся обжиговых печей является современной и важной задачей.

Диагностика крупногабаритного оборудования, каковыми являются вращающиеся печи, часто решалась с привлечением геодезических методов. Однако большинство из них, так же, как и традиционные способы измерений в машиностроении, не могут быть использованы на работающих агрегатах из-за необходимости контакта с объектом, что не всегда возможно из-за высоких температур в зоне эксплуатации ($+300^{\circ}\text{C}$). Ответственным моментом является определение геометрических отклонений в работе печи, то есть геометрическое положение основных ее узлов - корпуса, бандажей, роликов, что существенным образом влияет на положение оси печи. Такая диагностика носит название выверка печи. В настоящее время различают два принципиально разных способа выверки печей. Это традиционный «холодный способ» (с остановом и разгрузкой печи), который не учитывает температурных и динамических воздействий, и инновационный «горячий способ», при котором выверка производится без останова и разгрузки печи. В нашей стране второй метод до недавнего времени практически не использовался, ибо отсутствие методов технической диагностики, используемых в условиях высоких температур, препятствовала внедрению «горячей выверки». Поэтому разработка такого метода является важной и актуальной задачей, ибо его применение обеспечивает постоянную эксплуатацию оборудования и следовательно повышение его производительности.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение производительности роторного крупногабаритного производственного оборудования в процессе его эксплуатации на базе применения новейших методов и средств технической диагностики, и уменьшения затрат на ремонтно-восстановительные работы.

Для достижения этой цели были поставлены следующие научно-технические задачи:

- провести анализ методов определения геометрических характеристик крупногабаритного промышленного оборудования;
- разработать технологию и методику определения геометрических характеристик объекта в процессе его эксплуатации;
- обеспечить выбор и применение средств диагностики и контроля и разработку средств технологического оснащения;
- разработать и теоретически обосновать выбор диагностических параметров и методы их математической обработки;
- разработать 3D модель исследуемого объекта;
- итоговые результаты замеров получать с использованием методов математического и компьютерного моделирования;

- обеспечить внедрение разработки на промышленных предприятиях.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- разработана методика построения геодезического мониторинга роторного крупногабаритного производственного оборудования, позволяющая диагностировать геометрические параметры роторных объектов с высокой точностью; без останова и разгрузки оборудования;
- разработан метод по совершенствованию процесса диагностики роторного крупногабаритного производственного оборудования на основе использования прогрессивных средств контроля и компьютерной обработки полученных результатов;
- разработаны теоретические основы диагностики крупногабаритных роторных производственных объектов и математический аппарат для получения конечных результатов, что обеспечивает достоверность и точность получаемой информации об объекте;
- разработан новый технологический метод горячей выверки, позволяющий в условиях эксплуатации производственного оборудования с высокой точностью определять требуемые параметры, дефекты и причины их возникновения;
- разработаны методы математического моделирования с целью получения итоговых результатов диагностики и обеспечения автоматизированной компьютерной обработки;
- разработан метод получения 3D модели объекта, что наглядно позволяет оценить состояние печи, в том числе дефекты внутренней футеровки.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- методика построения геодезического мониторинга роторного крупногабаритного производственного оборудования, что позволяет определить их геометрические параметры с высокой степенью точности без останова и разгрузки оборудования;
- технологический метод горячей выверки, обеспечивающий определение требуемых параметров, дефектов, а также технологию и оборудование для их устранения;
- метод математического моделирования объекта для получения итоговых результатов диагностики и автоматизации компьютерной обработки по соответствующей программе;
- алгоритм получения 3D модели объекта с целью обеспечения оценки его состояния, в том числе положения бандажей, роликов, дефекты внутренней футеровки.

Практическая значимость и результаты исследования. Разработанный технологический метод горячей выверки позволяет обеспечить осевой баланс вращающегося крупногабаритного оборудования в процессе его эксплуатации и оперативное устранение обнаруженных дефектов. Реализация метода и его внедрение более чем на 100 объектах позволили получить высокий экономический эффект.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы, результаты исследований и их практическое применение неоднократно докладывались, обсуждались и получили одобрение на ряде научно-

технических семинарах, конференциях, международных выставках и промышленных предприятиях в 2015-2023 годах. По тематике диссертации автор выступал с лекциями в Промышленной академии РФ на курсах повышения, квалификации главных механиков цементных заводов.

Публикации по теме диссертации. Основные результаты исследований представлены в 2-х патентах, 1-ой заявки на патент и 8 статьях, из которых 4 опубликованы в журналах, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура диссертации.

Общий объем диссертации составляет 153 страницы машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, списка литературы, включающего 136 наименований, содержит 17 таблиц, 72 рисунка и приложения.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, дана общая характеристика диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены объекты исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 проведен анализ литературных источников по вопросам определения геометрических параметров крупногабаритных вращающихся производственных объектов, рассмотрены конструкции и способы производства продукции на этом оборудовании. (Рис. 1). Большое внимание уделено вопросам диагностики состояния оборудования, методам определения отклонения геометрических параметров.



Рис. 1. Вращающаяся цементная печь

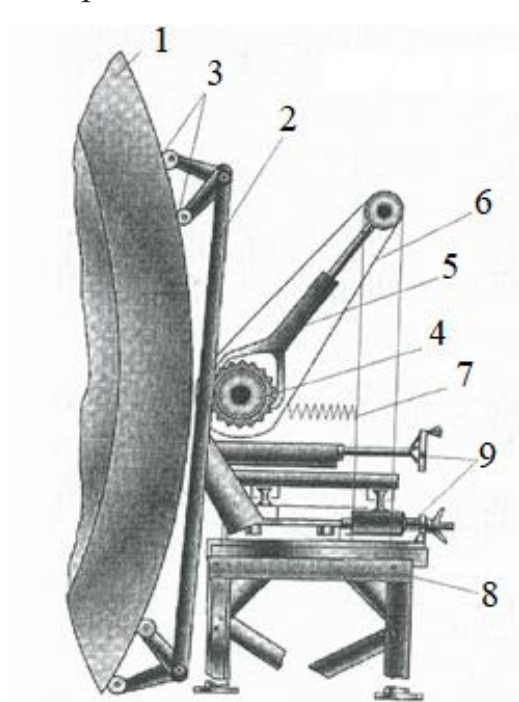
Трудности при их определении состоят в том, что производство, например цемента в цементных вращающихся печах, происходит при температурах внутри корпуса печи свыше 1000°C , а на корпусе печи температура составляет $300-350^{\circ}\text{C}$. Поэтому отсутствие средств диагностики, которые бы работали в условиях повышенных температур, не обеспечивало получение оптимальных результатов при

определении геометрических параметров объекта и фиксации их отклонений. Следовательно, поиск новых методов и средств технической диагностики является важной и актуальной задачей, которая была поставлена в настоящем исследовании. В процессе разработки системы технической диагностики (СТД) крупногабаритных роторных объектов прорабатывались методы диагностики металлорежущего оборудования, так как диагностика станков имеет определенное сходство с диагностикой крупногабаритного роторного оборудования. Контроль готовности к работе механизмов и узлов металлорежущих станков осуществляется встроенными средствами технического диагностирования, а аварии предотвращаются предохранительными устройствами. Широкое применение получило вибродиагностирование станков.

Однако, учитывая габариты и высокую температуру корпуса крупногабаритного оборудования, при диагностике следует использовать и другие более современные средства и методы контроля, а именно электронные, лазерные и др. Особого внимания заслуживает износ соприкасающихся поверхностей основных узлов, каковыми являются бандажи и ролики, что оказывает существенное влияние на положение геометрической оси крупногабаритного вращающегося объекта.

Необходимость в ремонте бандажей и роликов объясняется тем, что на них развиваются поверхности износа, сам износ ускоряется, стоимость эксплуатации растет и со временем дефекты приводят к аварийному состоянию. Для решения указанной проблемы было принято решение о создании новых технологических методов и оборудования для чистовой обработки бандажей и роликов. Теоретические предпосылки и исследования технологических методов, а также опыт зарубежных компаний говорит о том, что наиболее предпочтительной является обработка методом шлифования. Для этих целей была разработана технология и соответствующее оборудование.

Реализация предлагаемого способа иллюстрирована устройством, изображенном на Рис. 2, где 1 - обрабатываемая цилиндрическая деталь - бандаж



вращающейся печи, 2 - траверса, взаимодействующая с бандажом посредством роликов 3, свободно перекатывающих по бандажу 1, колесо 4 установлено на рабочем органе 5 с бесконечной абразивной лентой 6. Рабочий орган 5 подпружинен пружиной 7 относительно рабочего стола 8, имеющего механизмы 9 для перемещения рабочего органа 5 в необходимых направлениях.

Предлагаемая шлифовальная установка характеризуется небольшими габаритами, мобильностью, возможностью быстрой установки на месте проведения работ и последующим быстрым демонтажем, а также возможностью быстрой переналадки на требуемые размеры обрабатываемых деталей.

Рис.2. Установка для шлифования цилиндрических деталей

В Главе 2 предложены теоретические основы диагностики крупногабаритных вращающихся объектов.

Основным условием надежной работы вращающейся печи является поддержание соответствующих геометрических размеров её конструктивных элементов во время производства материала. В процессе эксплуатации печи должны обеспечиваться прямолинейность оси вращения печи в горизонтальной и

вертикальных плоскостях; параллельность горизонтальной и вертикальной оси роликов относительно оси печи; проектный уклон оси печи и некоторые другие параметры.

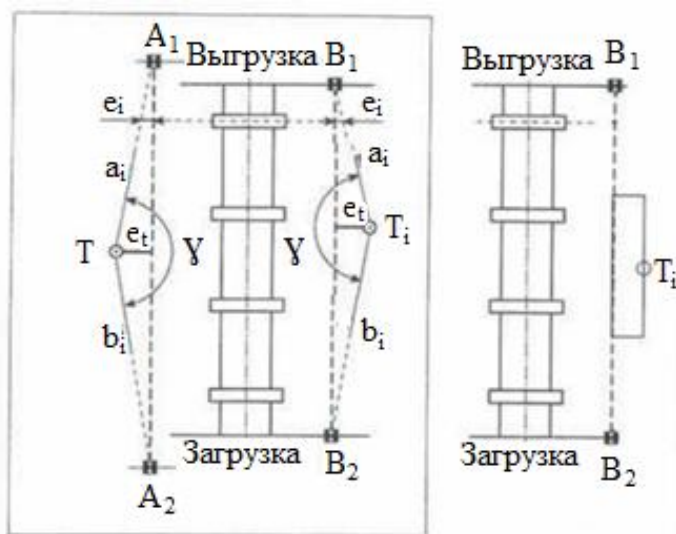
В настоящем исследовании приводится методика, позволяющая проводить сложные измерения геометрии и центровки вращающейся печи на основе диагностики и применения современных средств контроля, компьютеров и лазерных устройств, что значительно упрощает измерения и расчёты.

Опорной базой для определения горизонтальных смещений оси печи и для определения горизонтального положения опорных роликов являются две фиксированные прямые линии – A_1A_2 и B_1B_2 , расположенные с обеих сторон печи. Эти прямые теоретически могут быть параллельными друг другу и оси печи, но на практике это не всегда возможно. Расстояние между фиксированными контрольными линиями на стороне загрузки и стороне выгрузки измеряется с точностью $\pm 0,5$ мм (Рис. 3).

Все измерения по бандажам и роликам выполняются с использованием тахеометра, расположенного в любой точке по отношению к точкам линий $A_1 A_2$ и $B_1 B_2$.

Расположение тахеометра T_i , определяется расстояниями a и b , а эксцентриситет « e » рассчитывается по формуле:

$$e_t = \frac{a_i \times b_i}{a_i + b_i} \sin \gamma_i, \text{ где}$$



A_j, b_j -расстояние тахеометра от мишеней;

γ_i - угол между точками A_1, T_i, A_2 . Угол γ_1 должен быть близок к 180° , что означает, что тахеометр должен располагаться по линии A_1-A_2 . По соображениям точности эксцентриситет « e » не должен быть больше 10-12 мм.

Рис. 3. Расположение тахеометра в зоне контрольных линий

Базу вертикальных измерений создают реперы, установленные на каждой опоре в местах удобных для

выполнения измерений бандажей и роликов (Рис. 4).

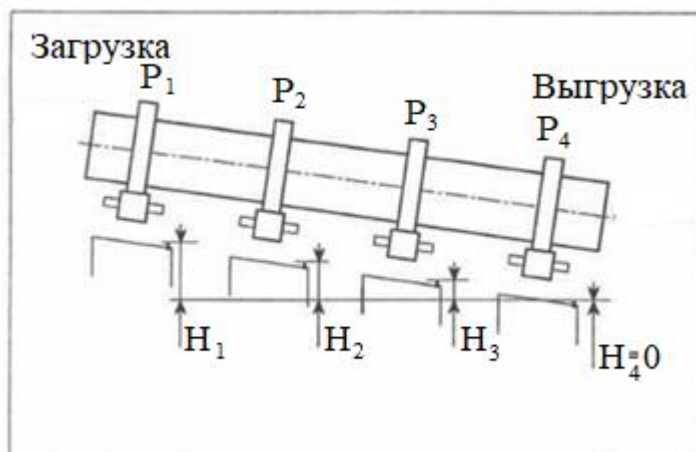


Рис. 4. База вертикальных измерений

высотных отметок реперов не должно отличаться более чем на 0,8 мм.

Основной целью выверки является определение прямолинейности оси вращения печи в местах, где на корпус печи смонтирован бандаж, который опирается на опорные ролики (Рис.5).

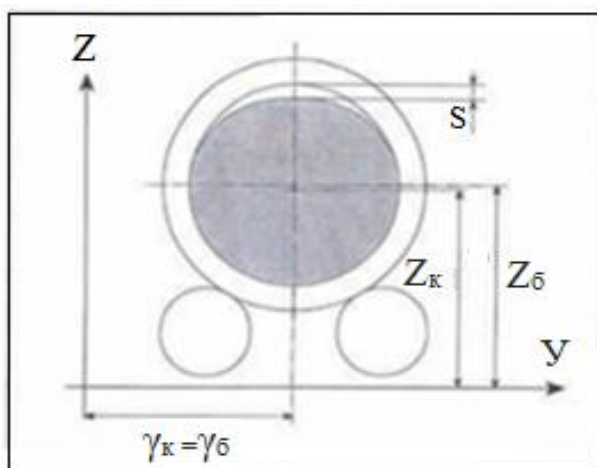


Рис. 5. Положение бандажа и корпуса при выравнивании

измерительного устройства и соответствующей касательной к бандажу печи. На практике измерения по выверке печи проводятся в местах, где установлены бандажи, путём определения координат соответствующим касательным линиям к бандажам.

Определение координат касательных линий производится во время работы печи с обеих ее сторон на инварные геодезические рейки, расположенные горизонтально в плоскости определенного поперечного сечения печи (Рис. 6). Если выбранная точка, принятая в качестве начальной точки (например точка 1), проецируется на инварную рейку с одной, а затем, после поворота этой точки на

Высота реперов на последней опоре P_4 принимается равной нулю (обычно это самая низкая отметка печи). Высотные отметки реперов замеряются между собой и каждый репер имеет заданную высоту H_i . Точность определения высоты реперов между опорами не должна быть ниже $\pm 0,5\text{мм}$, а это означает, что повторное измерение одних и тех же

В горизонтальной плоскости ось корпуса и ось бандажа одинаковы:

$$\gamma_k = \gamma_b$$

Тогда как в вертикальной плоскости из-за подбандажного зазора «S» между бандажом и корпусом координаты Z создают зависимость:

$$Z_k = Z_b - \frac{S}{2}$$

Горизонтальная координата оси вращения печи Y_1 в поперечном сечении может быть определена на основе данных, полученных путём измерений с использованием спроектированного

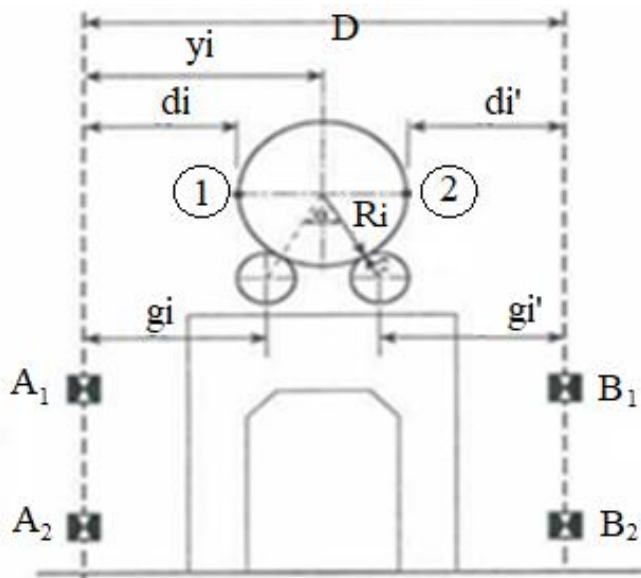


Рис. 6. Схема определения горизонтальных координат

180°, с другой стороны печи, тогда известно расстояние между ними. Зная фиксированные прямые линии D и расстояния d_i и d_i' от координаты, соответствующей касательной линии к бандажу до фиксированной прямой, то можно определить диаметр $2R$ и положения оси вращения печи Y , по приведенным ниже формулам:

$$2R_i = D - d_i - d_i'$$

$$y = d_i + R_i; \quad y = d_i + \frac{D - d_i - d_i'}{2} - \frac{D + d_i - d_i'}{2}$$

Для уменьшения влияния деформаций бандажей, радиальных биений бандажей и вибраций опор на значение координат y_1 измерения проводятся в нескольких положениях печи.

Положения этих точек соответствуют одинаковым углам вращения печи и равномерно распределены по окружности бандажей. Для наблюдаемых точек предлагается использовать нижеследующие формулы:

$$R_{iavr} = \frac{D}{2} - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (d_i + d_i')}{2n}, \text{ где}$$

avr (от англ. Average - средний) - среднее значение R_i

$$y_{iavr} = \frac{D}{2} - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (d_i - d_i')}{2n}$$

С помощью данного метода определяется положение оси вращения печи в нормальных (перпендикулярных) сечениях всех бандажей, получая последовательность координат:

$Y_{1avr}, Y_{2avr}, Y_{3avr} \dots Y_{iavr} \dots Y_{navr}$

На основании измеренных значений d_i и d_i' , определяется положение геометрической оси печи в её конкретных мгновенных положениях. В соответствии с данными, приведенными на Рис. 7 можно констатировать:

$$y_{g1} = \frac{D + d_1 - d'_{13}}{2}; \quad y_{g2} = \frac{D + d_2 - d'_{14}}{2}; \quad y_{g3} = \frac{D + d_3 - d'_{11}}{2}; \quad y_{g4} = \frac{D + d_4 - d'_{12}}{2}$$

На основе приведенных выше данных определяется значение эксцентриситета q_i геометрической оси корпуса по отношению к его оси вращения в конкретных положениях печи с использованием следующих выражений:

$$q_1 = Y_{g1} - Y_{avz}, \quad q_2 = Y_{g2} - Y_{avz}, \quad q_3 = Y_{g3} - Y_{avz}$$

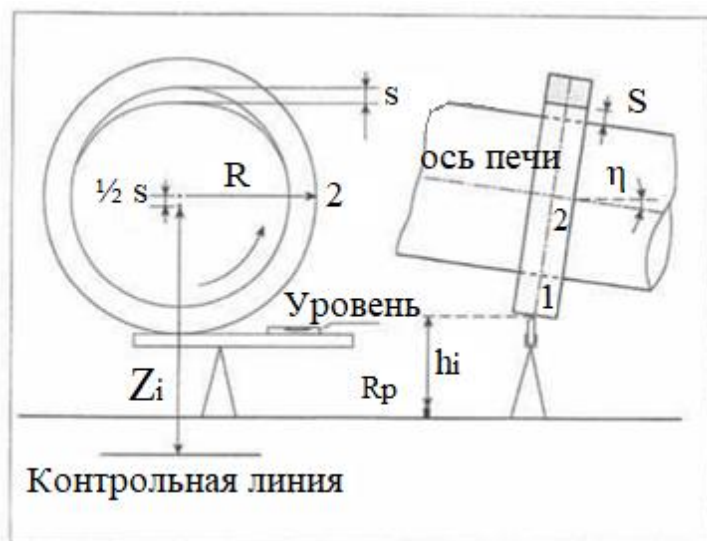


Рис.7. Схема расчета показателей печи

уровнем, которая во время работы печи образует горизонтальную линию, касательную к нижнему положению бандажа. Координата Z_i середины вращения печи в определенной секции, проходящей через середину ширины бандажа, рассчитывается путём применения данных, отмеченных на Рис. 8.

$$Z_i = H_i + h_i + R_i \cos \Pi - \frac{s}{2}$$

Аналогично измерениям в горизонтальной плоскости, в вертикальной плоскости замеры производятся в нескольких точках, равномерно распределённых по окружности бандажа. Среднее значение Z_i оси вращения для n -точек, наблюдаемых на окружности, рассчитывается по нижеприведенной формуле:

$$Z_{iavz} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} = H_i + R_i \cos \Pi + \frac{\sum_{i=1}^n Z_i - n H_i}{n} - \frac{s}{2}$$

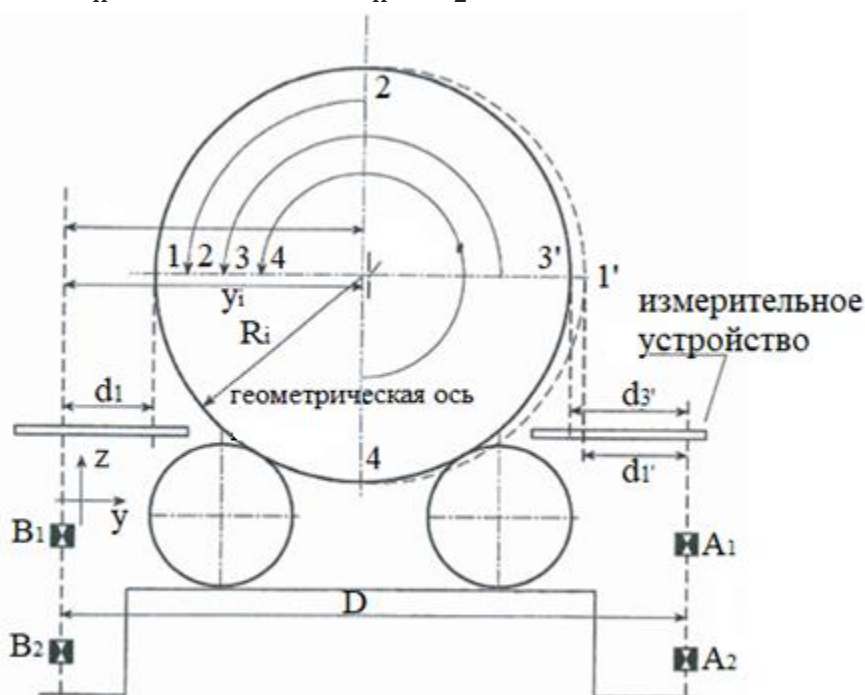


Рис. 8. Схема расчета вертикальной оси печи

Вертикальная координата Z_i оси вращения печи может быть определена на основе измерения, выполненного с использованием спроектированного измерительного устройства, установленного по касательной к нижней точке бандажа. Определение координаты самой нижней точки бандажа, расположенной в перпендикулярной плоскости к оси печи проходящей через середину ширины бандажа указано на Рис. 7.

Самая низкая точка бандажа определяется линейкой, оснащенной

Зная координаты Z_i , может быть рассчитан угол наклона печи, который обозначается в процентах по следующей формуле:

$$\Pi = \frac{Z_i - Z_n}{X_n - X_1} \times 100\%$$

Наклон корпуса печи обычно находится в пределах 3-5%.

Для окончательного определения прямолинейности оси вращающейся печи необходимо также

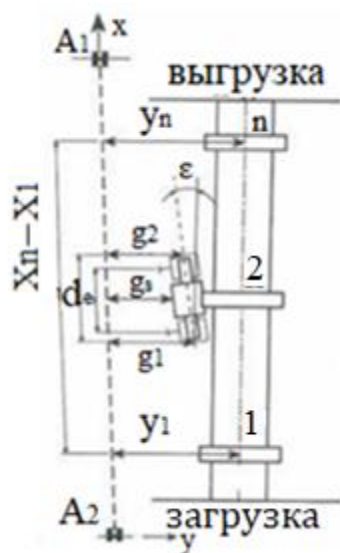


Рис. 9. Горизонтальное измерение ролика

определить: горизонтальное и вертикальное смещение оси опорных роликов; рабочие углы роликов; уклон печи; зазор зубчатого зацепления; уплотнения на входе и выходе печи.

Для определения **горизонтального** смещения оси ролика следует измерить расстояния g_1 и g_2 между контрольной линией A_1-A_2 и соответствующими точками оси вращения обоих подшипников ролика (Рис.9.) Также должны быть известны координаты оси вращения ролика, координаты оси вращения печи Y_1 и Y_n и расстояние между бандажами X_n-X_1 .

Координаты Y_1 рассчитываются по приведенной раннее формуле, а расстояние X_n-X_1 замеряется непосредственно с использованием лазерной рулетки. На основании этого, расчёт значения линейного изменения оси ролика проводится по формуле:

$$S_h = (g_2 - g_1) + d \frac{y_1 - y_n}{X_1 - X_n}$$

Угловое значение горизонтального изменения оси ролика рассчитывается по формуле: $\varepsilon = \arctg Sh/d$

Для окончательного получения значения геометрической оси печи следует определить также рабочий угол роликов, подбандажный зазор, характеристики зубчатого зацепления и некоторые другие параметры.

В процессе диагностики вращающейся печи результаты всех измерений записываются на терминал сбора данных, переводятся в соответствующие формы, которые по соответствующим программам обрабатываются на компьютере с получением результатов в виде мероприятий по обеспечению прямолинейности оси вращающейся печи.

Глава 3 посвящена построению 3D модели корпуса печи по выбранным сечениям, число которых определяется по числу обечаек, причем, в случае необходимости, можно выбрать любое количество сечений и расстояний между ними (Рис. 10).

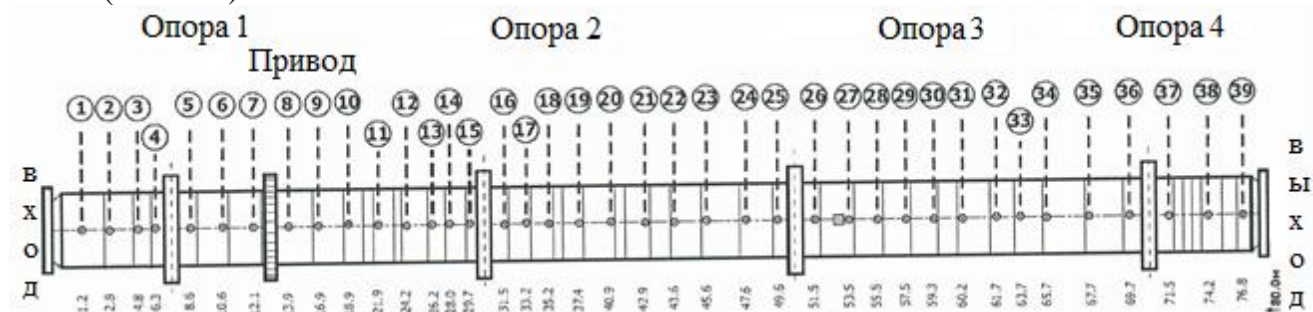


Рис. 10. Позиции секции для измерения профиля корпуса

Все измерения проводятся и использованием лазерного дальномера. Определение координат поперечных сечений корпуса и срединных сечений бандажей может производиться с помощью автоматизированной лазерной измерительной системы не менее чем в 32-х точках равномерно по окружности.

Данные, содержащие информацию о расстоянии и времени прохождения сигнала (примерно 734 измерения), полученные с лазерного дальномера, фиксируются в накопителе Workbot в виде текстового файла. Затем делается выгрузка данных в таблицу Excel и заносятся формулы для расчётов. В соответствующие таблицы заносятся расстояния от лазерного дальномера до корпуса печи, время измерений и часть оборота печи, пройденная за определенный интервал времени. Далее из массива данных определяются средние значения расстояний R_i для всех выбранных точек и формируется соответствующая таблица. Затем для расчетов используется теоретический радиус печи $R_{теор}$, который является наружным и соответствует идеальному состоянию корпуса.

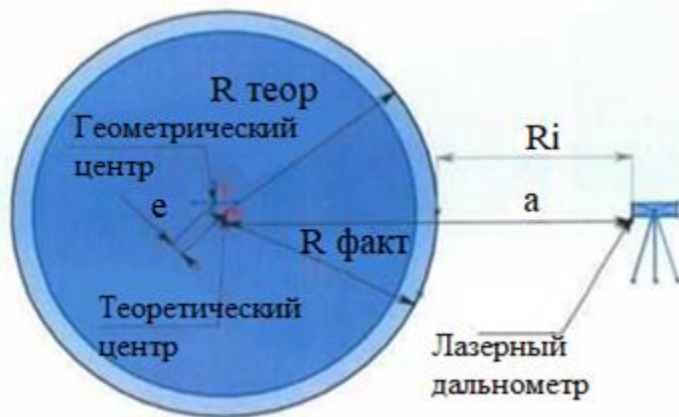


Рис. 11. Определение фактического радиуса

На Рис. 11 графически представлены основные параметры для расчётов, позволяющие в конечном итоге получить данные для построения 3D модели корпуса печи. Расчётный радиус печи определяется выражением: $R_{расч} = a - R_i$

Полученные расчеты для каждого из 32 измерений заносятся в соответствующую таблицу.

Затем с использованием тригонометрических функций и координаты геометрического центра (y, z) вычисляем итоговое значение

деформации корпуса с учетом смещения центра вращения-фактический радиус ($R_{факт}$).

$$\begin{aligned} A &= R_{рас} \times \sin \alpha; \\ B &= R_{рас} \times \cos \alpha; \\ R_{факт} &= \sqrt{(A - y)^2 + (B - z)^2} \end{aligned}$$

Расчётное значение для построения эскиза сечения получается по формуле:

$$\Delta R = R_{факт} - R_{теор}$$

Через координаты геометрического центра находим значение эксцентриситета по формуле:

$$e = \sqrt{y^2 + z^2}$$

Далее с помощью формулы: $C = e \times (-\sin(\alpha + \beta - 90^\circ)) \times \frac{\pi}{180}$

определяем биение от радиальной деформации. Полученные данные заносятся в таблицу.

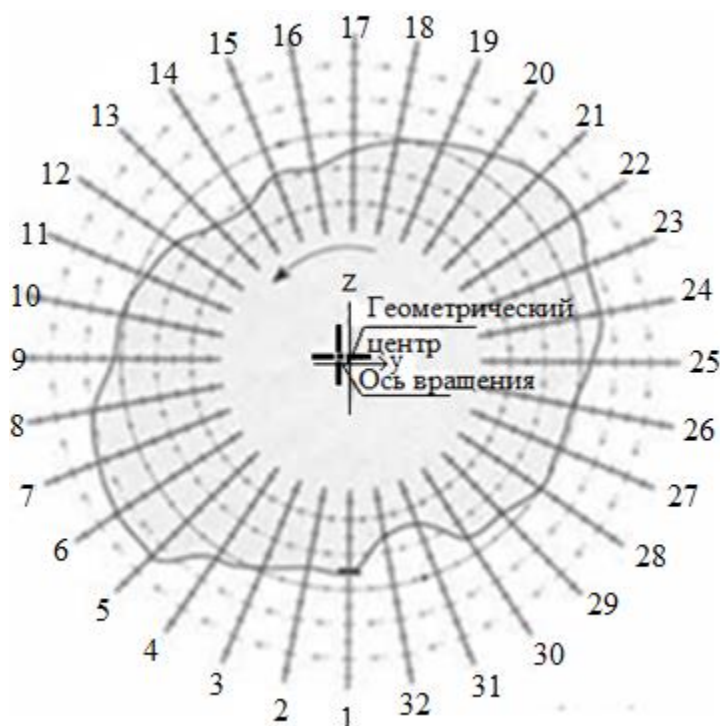


Рис.12. Радиальная диаграмма деформаций в одном сечении

трёхмерной модели в программе SolidWorks. На Рис. 13 представлена такая модель.

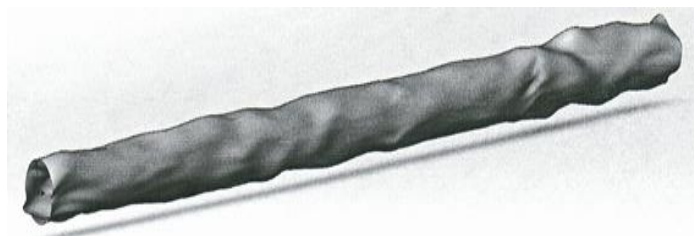


Рис.13. 3D-модель геометрической поверхности цементной.

Расчёты для дальнейшего построения сечений проводятся с помощью специализированной программы для автоматизации геометрического моделирования и инженерно-графических работ. По полученным табличным данным создаётся радиальная диаграмма деформаций для всех сечений, отражающая значение и направление эксцентриситеты корпуса печи по отношению к оси вращения. На Рис. 12 отображена радиальная диаграмма одного из сечений. Аналогичным образом формируются остальные сечения необходимые для полного построения 3D модели. Используя полученные данные в итоге 39 радиальных диаграмм, осуществляется построение

Данная трехмерная модель позволяет определить состояние корпуса печи, наличие на нем «горбов», а также отклонение его геометрического центра от оси вращения печи

Методология построения 3D модели корпуса обжиговой печи может успешно применяться также для расчета отклонений при диагностике радиального и торцевого биения бандажей, роликов и шестерен привода.

С использованием метода построения 3D модели объекта можно оценить состояние печи, планировать необходимость ремонта, определять участки печи для коррекции и оценки его влияния на опорные узлы и привод.

В Главе 4 рассмотрены методы диагностики, используемые контрольные инструменты и технология определения геометрической оси крупногабаритных роторных объектов. Объектом диагностирования является вращающаяся цементная печь. Необходимым условием нормальной работы вращающейся печи является прямолинейность ее оси вращения. Искривление оси даже в пределах допуска вызывает повышенный износ бандажей, опорных роликов и их

подшипников, увеличивает расход энергии, затрачиваемой на вращение печи, ускоряет разрушение огнеупорной футеровки и металлического корпуса.

Процедура диагностики с использованием техдокументации на объект представлена в структурной схеме (Рис.14), где отражены диагностируемые узлы и последовательность проведения диагностических операций.



Рис. 14. Структура процесса диагностики печи

Для выполнения своих функций система технического диагностирования должна иметь информационное, техническое и математическое обеспечение, на основе которых коллектив специалистов должен принимать решение о состоянии объекта, возможности его дальнейшей эксплуатации, необходимости замены или ремонта.

Информационное обеспечение — это способы получения диагностической информации, её хранение и систематизация. Техническое обеспечение — представляет собой совокупность устройств получения и обработки информации (приборы, датчики, ЭВМ). Математическое обеспечение — это алгоритмы и программы распознавания.

С целью получения достоверности и высокой точности при определении геометрических параметров вращающейся печи были выбраны и использованы следующие виды оборудования: - инженерный электронный тахеометр, нивелир, лазерный дальномер, электронный индикатор часового типа, оптический центрир вертикального проектирования, пирометр, электронный накопитель данных, программный комплекс для выполнения необходимых расчётов на компьютере.

Основным отличием диагностического комплекса горячей выверки (ДКГВ) от выверки в статическом положении является безостановочный процесс производства, при котором оборудование остаётся в рабочем режиме при

отсутствии простоя оборудования; при этом диаметры всех рабочих узлов измеряются с учётом теплового расширения; также производится замер обечаек корпуса на наличие деформации; построение 3D модели объекта демонстрирует деформации корпуса, торцевое и радиальное биение бандажей и венцовой шестерни. В результате замеров составляется схема механической наладки, обеспечивающей осевое перемещение агрегата и даются рекомендации по восстановлению объекта.

Важным фактором горячей выверки является обеспечение осевого баланса, что гарантирует правильное положение оси печи и положение осей роликов, а также обеспечивает качественное состояние рабочих поверхностей бандажей, роликов и фундаментных рам.

На Рис. 15 в виде структурной схемы представлена технологическая последовательность горячей выверки и формы для фиксации каждого этапа с целью дальнейшей математической и компьютерной обработки для получения итоговых результатов.

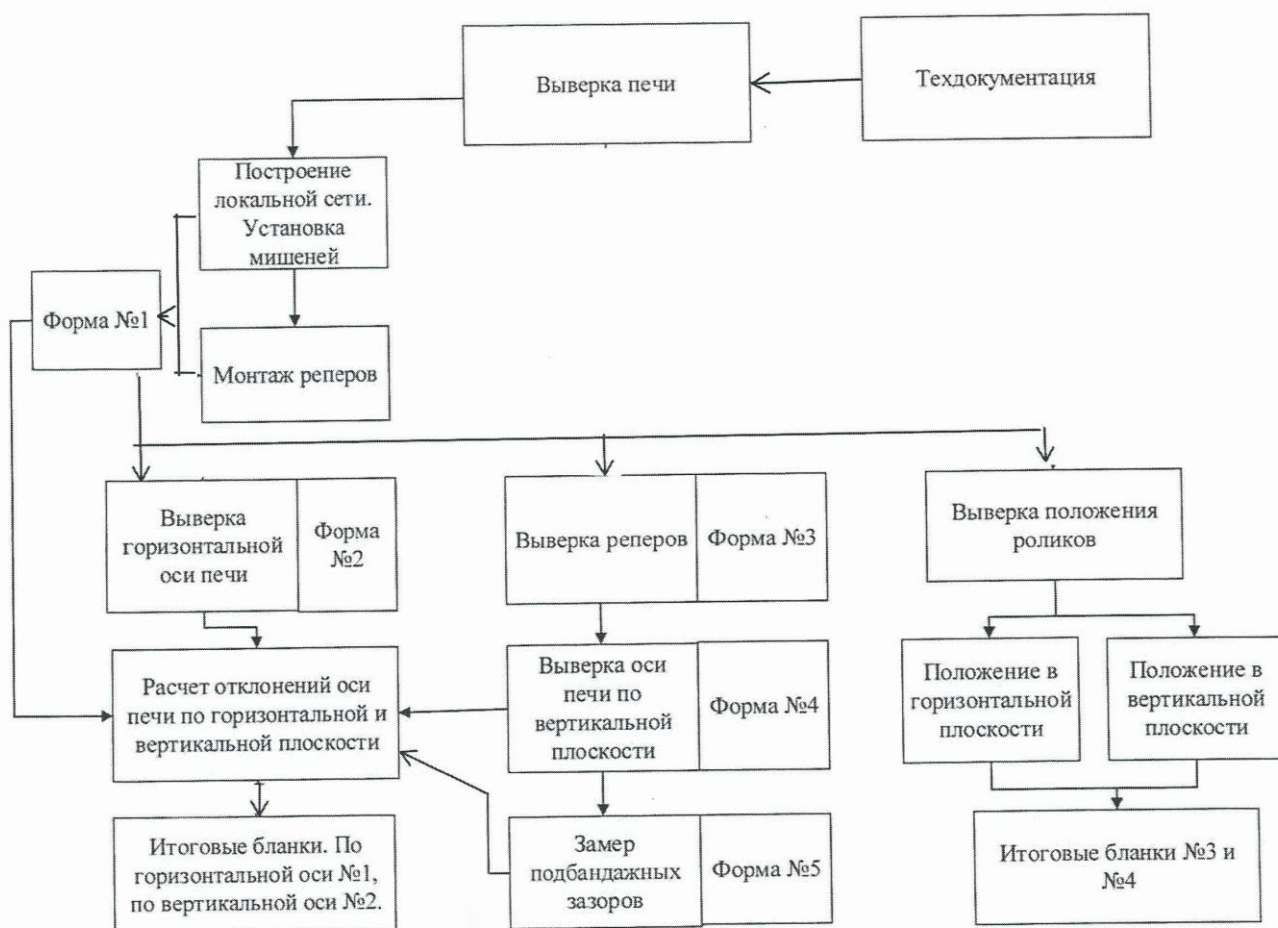


Рис. 15. Структура выверки печи

В процессе горячей выверки обеспечивается получение комплекса диагностических параметров для выполнения дальнейших мероприятий по установлению прямолинейности оси вращающейся печи. К таким мероприятиям относятся механическая наладка и установка агрегата в проектно-эксплуатационное положение. **Механическая наладка** является обязательным этапом, следующим после диагностики и горячей выверки печи. План

механической наладки составляется при обработке и оценке информации, полученной в ходе выверки. Комплекс операций, предусмотренный планом наладки, позволяет равномерно распределить нагрузку по всем опорам, что приводит к снижению износа бандажей и опорных роликов, подшипников, а также снижает риск внезапных незапланированных остановок печи.

По результатам диагностики вращающейся печи в автоматическом режиме заполняются соответствующие формы (см. Приложение), фиксирующие замеры положения горизонтальной и вертикальной оси печи; подбандажный зазор; измерение параметров, характеризующих вертикальные перемещения роликов; измерение параметров, показывающих изменения деформации корпуса; измерения овальности бандажей и корпусных обечаек, а также некоторые другие параметры.

С учётом полученных в результате диагностики параметров, отражённых в соответствующих формах, осуществляется компьютерная обработка данных таблиц и выдаются окончательные результаты, позволяющие фиксировать значение положения оси вращающейся печи и мероприятия по достижению геометрической прямолинейности оси печи.

Способ горячей выверки по восстановлению прямолинейности оси вращающейся печи является особенно экономически эффективным, ибо процесс диагностики и частичное восстановление параметров происходит при эксплуатации печи, а следовательно, осуществляется выход готовой продукции в течение всего периода горячей выверки (5-7 суток). Поэтому можно судить о том, что в период выполнения горячей выверки происходит фактическое повышение производительности труда, благодаря чему увеличивается выпуск готовой продукции.

Расчеты эффективности от применения метода горячей выверки осуществлены для двух предприятий, работающих по производству цемента и минеральных удобрений. Это 2 разных предприятия, оборудование которых при производстве готовой продукции различного назначения, отличается по своим размерам и технологиям производства, но при этом используются конструктивно сходственные вращающиеся печи. Производительность 3-х опорной вращающейся печи при производстве цемента в течение суток составляет 5000 тонн, а производительность 6-ти опорной вращающейся печи при производстве фосфатных удобрений составляет порядка 200 тонн в сутки. С учетом стоимости цемента и удобрений экономическая эффективность при эксплуатации оборудования в течение выполнения процесса горячей выверки составляет порядка 50 млн. рублей в первом случае и 120 млн. рублей во втором. И естественно, что общий экономический эффект значительно увеличивается при тиражировании технологии на других предприятиях. При этом затраты предприятий полностью окупаются в течение короткого времени за счет выпуска продукции при работе оборудования в течение времени осуществления горячей выверки.

Заключение

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и, впервые в нашей стране, представлено новое эффективное техническое решение задачи обеспечения соосности крупногабаритного вращающегося оборудования, в процессе эксплуатации, что обеспечило значительное повышение его производительности и эффективности.

Основные выводы и результаты диссертационной работы

1. Разработаны теоретические основы диагностики крупногабаритных вращающихся производственных объектов, диагностические методы определения горизонтальных и вертикальных координат оси вращающейся печи и математический аппарат для получения конечных результатов, что обеспечивает достоверность и точность полученной информации об объекте.

2. В целях обеспечения соосности и устранения износа бандажей и роликов разработан технологический метод и переналаживаемое оборудование для восстановления геометрических размеров и чистоты поверхности крупногабаритных цилиндрических деталей методом ленточного шлифования.

3. Разработан метод трехмерного моделирования, позволяющий проанализировать состояние геометрии корпуса печи и её связь с бандажами, роликами и приводом на экране монитора.

Преимуществом данного метода является возможность оценки состояния печи, планирования необходимых ремонтов и замены оборудования, определения участка печи для коррекции и оценки его влияния на бандажи, ролики и привод.

4. Методы трёхмерного моделирования позволяют не только определить отклонения и деформации корпуса крупногабаритных вращающихся объектов, но и проводить точные расчёты биений опорных узлов и привода.

5. Разработан новый технологический метод горячей выверки, позволяющий в условиях эксплуатации производственного оборудования, определить геометрическую ось вращающейся печи и фиксировать отклонения параметров, требующих корректировки с целью устранения возникающих дефектов и обеспечения соосности диагностируемого оборудования.

6. В результате проведения экспериментальных работ осуществлён выбор прогрессивного контрольного инструмента, определена последовательность проведения диагностических операций, что обеспечивает высокую точность и достоверность получаемых в процессе диагностики параметров с целью их дальнейшей обработки и получения итоговых результатов.

7. Разработаны алгоритмы и программы обработки в компьютерном режиме диагностической информации с целью получения окончательных результатов, позволяющих фиксировать значения параметров оси вращения печи и осуществлять мероприятия по обеспечению её прямолинейности.

8. Диагностический комплекс горячей выверки внедрен на многих предприятиях и обеспечивает высокий экономический эффект, так как в отличие от холодной выверки не требует останова оборудования и не прерывает выпуск продукции. По расчетам специалистов реальные потери от простоя единицы оборудования в течение суток составляют от 10,0 до 20,0 млн. рублей.

9. Практика внедрения метода горячей выверки показала, что на предприятиях строительной индустрии при производстве цемента экономический эффект за время проведения метода (5-7 суток) составляет порядка 50 млн. рублей, а на предприятиях химической промышленности при производстве удобрений - до 120 млн. рублей.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Перепечай Б.А., Гончаров А.А. Методы организации системы технического обслуживания и ремонта оборудования с целью обеспечения его безотказной работы. М., «Ремонт. Восстановление. Модернизация», № 2, 2017. С. 35-40.
2. Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.А. Технологии восстановления основных узлов конусных дробилок. М., «Ремонт. Восстановление. Модернизация» №1, 2017. С.13-18.
3. Утенков В.М., Гончаров А.А., Иванов В.А. Моделирование положения вращающихся цементных печей с целью определения неисправностей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орловский ГУ им. И.С. Тургенева, №1 (369), 2025. С. 33-39.
4. Гончаров А.А., Утенков В.М., Иванов В.А. Восстановление вращающихся цементных печей на базе диагностики в процессе эксплуатации. – М; «Ремонт. Восстановление. Модернизация.» № 9, 2023. С. 23-28.
5. Тулинов А.Б., Иванов В.А., Гончаров А.А. Практика применения металлополимеров для восстановительных работ. Сборник трудов. Тезисы докладов II международной научно-технической конференции «современные достижения в области клеев и герметиков: материалы, сырье, технологии» Новгород. 2016. 246 с.
6. Гончаров А.А., Гончаров А.Б., Тулинов А.Б. Технология сервисного обслуживания производственного оборудования. М.: «Золото и технологии». №1, 2022. С. 142-146.
7. Гончаров А.Б., Гончаров А.А., Тулинов А.Б. Прогрессивные технологические методы восстановления крупногабаритного производственного оборудования. М.: «Золото и технологии», №4, 2022. С.88-92.
8. Утенков В.М., Гончаров А.А. Разработка 3D-модели крупногабаритного вращающегося производственного оборудования. Материалы международной научной конференции «Современные проблемы прикладной математики, информатики и механики» на базе каб.-балк. ГУ пос. Эльбрус 22-26.06.2023.
9. Гончаров А.Б., Гончаров А.А. Измерительное устройство для «горячей выверки» оси вращающейся печи. Патент № 2630995 от 28.07.2014.
10. Гончаров А.Б., Гончаров А.А., Тулинов А.Б. Способ «горячей выверки» положения оси вращающейся печи. Патент № 2665024 от 02.05.2017.
11. Гончаров А.А., Иванов В.А. Способ динамической выверки оси вращающейся печи. Заявка на патент № 2023113454 от 24.05.2023.