

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-107-117

*Гетьман Ю.А., Погонин А.А., Бондаренко Ю.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ БАРАБАННОЙ ПЕЧИ И ОПОРНЫХ РОЛИКОВ В ANSYSMECHANICAL

Аннотация. Барабанная печь, на первый взгляд, представляет собой достаточно простой конструктивный объект, который очень широко распространён в промышленности обработки и получения материалов, как для строительства, так и для других целей. Но за внешней простотой, скрываются сложные химические процессы, механические, тонкости системы управления, технология изготовления крупногабаритных деталей, входящие в общую сборку и непосредственно вопросы, связанные со стадией проектирования, модернизации. Исследование различных закономерностей механических процессов, связанных с теорией упругости, кинематикой, контактными взаимодействиями представляет собой сложность даже в отдельности, не говоря уже о том, когда процессы протекают совместно. Изучение контактного взаимодействия печи с роликовыми опорами позволяет увидеть аномальные эффекты, которые могут возникнуть при неправильном конструктивном исполнении. В конкретном случае необходимо пронаблюдать, как под действием внешних сил, происходят изменяющиеся во времени деформации, перемещения, отдельных элементов конструкции, которые имеют ключевое функциональное значение в работе оборудования, в условиях контактного взаимодействия отдельных его деталей, с учётом инерционных нагрузок и демпфирования. Исследование переходных процессов с изменяющимися силовыми факторами во времени позволит нам получить отклик конструкции на внешние воздействия.

Ключевые слова: печь, опоры, напряжения, конструкция, контакт, колебания, время, изменение.

Введение. Вращающиеся барабанные печи, как и их отдельные детали, это весьма крупногабаритные промышленные объекты. Одна из наиболее важных «деталей», это венцовое зубчатое колесо, которое монтируется на барабанную печь. Для удобства перевозки и монтажа оно представляет собой сборочную единицу, разделённую на 4 отдельных сектора (Рис. 1).

Далее сектора устанавливаются на барабанную печь поближе к одной из опорно-роликовой конструкции, где минимальны прогибы под собственным весом печи, что позволяет более точно осуществить монтаж и установить привод вращения данного зубчатого колеса. Основным интересом представляют опоры печи, опорные ролики, по которым осуществляется качение обечайки печи через бандаж, с последующим вращением вокруг собственной оси. Именно они воспринимают большую часть нагрузок как статические, так и динамические, и эффективность работы данного оборудования напрямую зависит от их состояния. Моделирование переходного процесса производим в системе AnsysWorkbench [1–3].

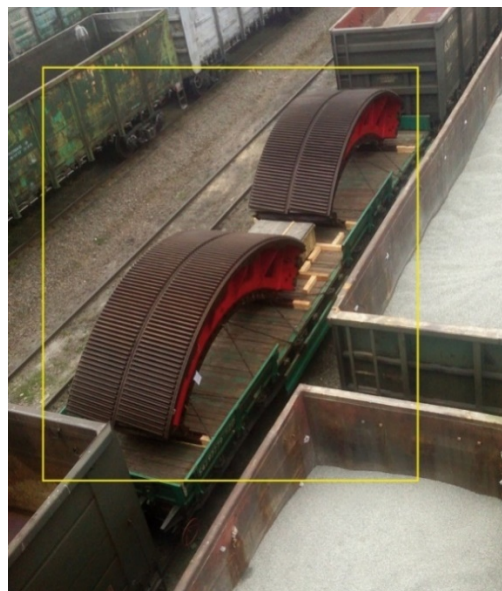


Рис. 1. Приводное зубчатое колесо в разборе на ЖДВ г. Белгород

Основная часть. Суть моделирования переходных процессов заключается в получении отклика конструкции, которая находится под действием изменяющихся или постоянных внешних

силовых факторов [4–5]. Учитывая инерционность и демпфирование моделировании реальных кинематических пар и их комбинаций осуществляется при помощи различных шарниров. Моделирование проводим в модуле TransientStructuralCAE-системы AnsysWorkbench. В отличие от статического анализа, где отсутствует величины изменяющиеся во времени, данный модуль использует общее уравнение движения:

$$[M] \cdot \{d^2x/dt^2\} + [C] \cdot \{dx/dt\} + [K] \cdot \{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

где $[M]$ – матрица масс, $[C]$ – матрица коэффициентов демпирования, $[K]$ – матрица коэффициентов жёсткости, $\{x\}$ – вектор перемещений в элементах или узлах (с соответствующими производными первого и второго порядков по времени), $\{F(t)\}$ – вектор внешних сил.

Особенностью конструктива вращающейся печи является то, что вращение барабана и роликовых опор значительно отличаются, передаточное отношение может составлять в среднем 18–25 [6–7]. Это значит, что часть массы конструкции вращается с одной скоростью, корпус печи, с частотой около 2-3 об/мин, а роликовые опоры с намного большей скоростью, пропорционально передаточному отношению. Ввиду этого, при расчёте, и получении выходных зависимостей, таких как, перемещения, деформации и напряжения используются неявные схемы интегрирования системы дифференциальных уравнений [8]. Применение неявных схем необходимо, ввиду жёсткости системы уравнений, когда коэффициенты при соответствующих неизвестных сильно

разнятся от уравнения к уравнению. Решение такой системы явными методами, например, методом Рунге-Кутты пятого порядка, приводит к потере устойчивости, то есть, сам характер полученного решения зависит от выбранных коэффициентов, чего в принципе не должно быть. Эта проблема обычно решается выбором более мелкого шага интегрирования, но тем самым увеличивается количество итераций, достигающих порой десятков тысяч или даже миллиардов. Неявные методы, такие как, неявные схемы Адамса-Мултона, метод Розенброка, позволяют избежать такого количества итераций. Характерны для задач, в которых присутствуют как быстропротекающие, так и медленнопротекающие процессы одновременно.

Для анализа используем конструктивные параметры реальной вращающейся печи фирмы СЕМЕО для переработки отработанных аккумуляторных батарей. Диаметр внутреннего отверстия печи равняется 3.58 м, длина составляет 78 м. Масса печи составляет 101 тонну и грузоподъёмность 100 тонн. Чтобы примерно учесть загрузку материалом, скорректируем некоторые размеры так, чтобы вес печи составлял чуть более 200 тонн. Ширина бандажей – 1 м, ширина опорных роликов – 1.2 м. Ролики установлены асимметрично, относительно оси симметрии бандажа, находящейся в плоскости размеров. Смоделируем расчётную схему, 3d – модель, и зададим нестандартное расположение бандажей и роликовых опор, чтобы выявить какие могут быть аномальные явления (рис.Рис 2) [9]. Печь является самой небольшой по размерам из всего модельного ряда производителя СЕМЕО.

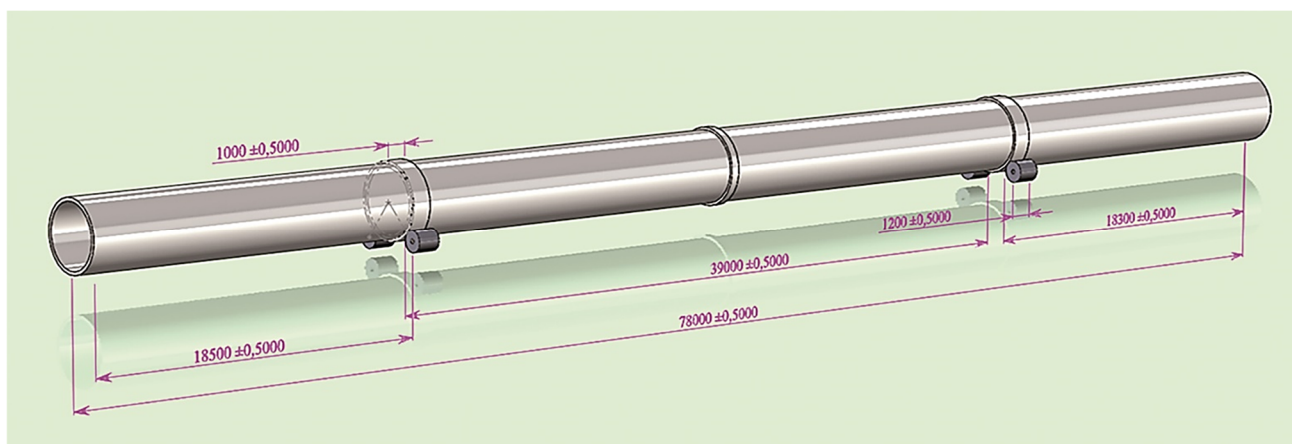


Рис. 2. Перспективная проекция печи

Расположение роликовых опор в боковой проекции также несимметрично, угол разлёта роликов отличается от стандартных 60° градусов.

В модуле TransientStructural задаем настройки необходимые для моделирования.

Главным условием при моделировании контактного взаимодействия в динамических задачах является наличие жёсткости у контактирующих тел. Эта жёсткость может быть сколь угодно большой, главное, чтобы тело не являлось абсо-

лютно жёстким по отношению ко всем остальным. Это важно, так как многие характеристики контакта, а также сходимость задачи по силовым факторам, будут просто отсутствовать. Задаем условие контакта между цилиндрической поверхностью ролика и бандажа, контакт тип Frictional с коэффициентом трения 0,2 (сталь-сталь) [10]. Другая характеристика контакта – симметричность (асимметричность) характеризует проникновение или его отсутствие у тел. Для данной задачи оставим эту настройку на автоматическом режиме, контакт скорее будет асимметричным,

потому что в данном случае, сборка не является неподвижной и исследуется взаимное вращение (зацепление) материала о материал (рис. 3). В реальности, моделирование проникновение опоры бандажа в роликовую поверхность, может объяснять попаданием частиц абразива на гладкую поверхность, свариваемость с металлом и последующим вырыванием частиц металла из поверхности. Это приводит к резкому увеличению шероховатости и силам трения и способствует скорейшему износу роликовых опор.

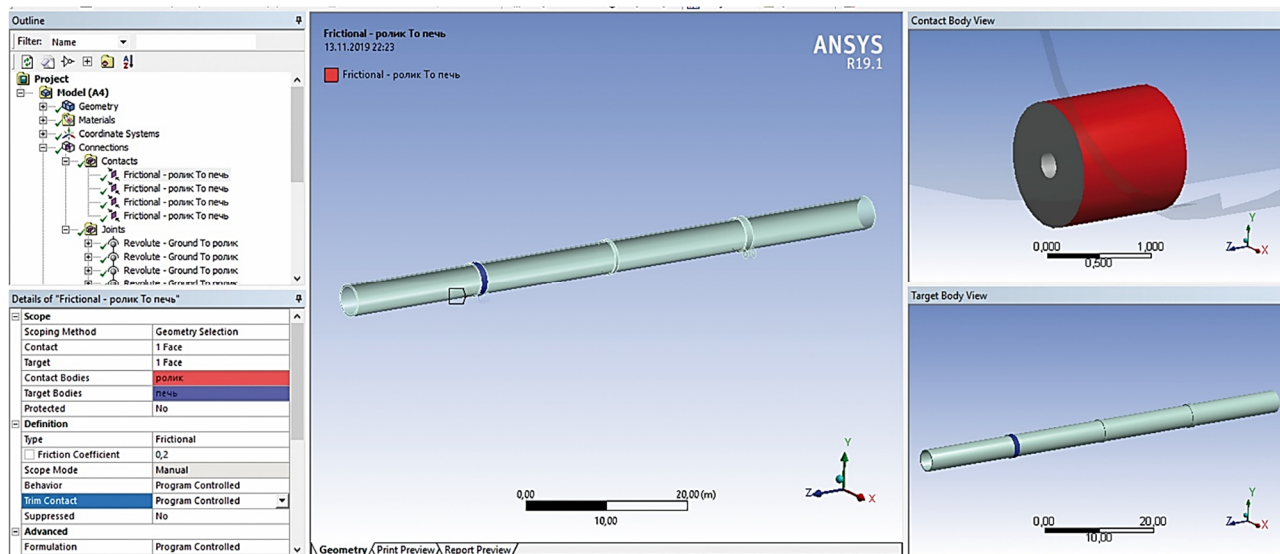


Рис. 3. Окно настройки контакта

Имитацию посадки на вал зададим шарнирным соединением типа Body-Ground, подтип Revolute. В качестве поверхности вращения зададим сквозное центровое отверстие в ролике.

Создаем сетку (рис. 4) по умолчанию, так как, проверено, что при уменьшении размера элемента, к примеру ролика, в 2–3 раза, ведёт к увеличению времени расчёта в не пропорциональное количество раз, а также к нехватке оперативной памяти.

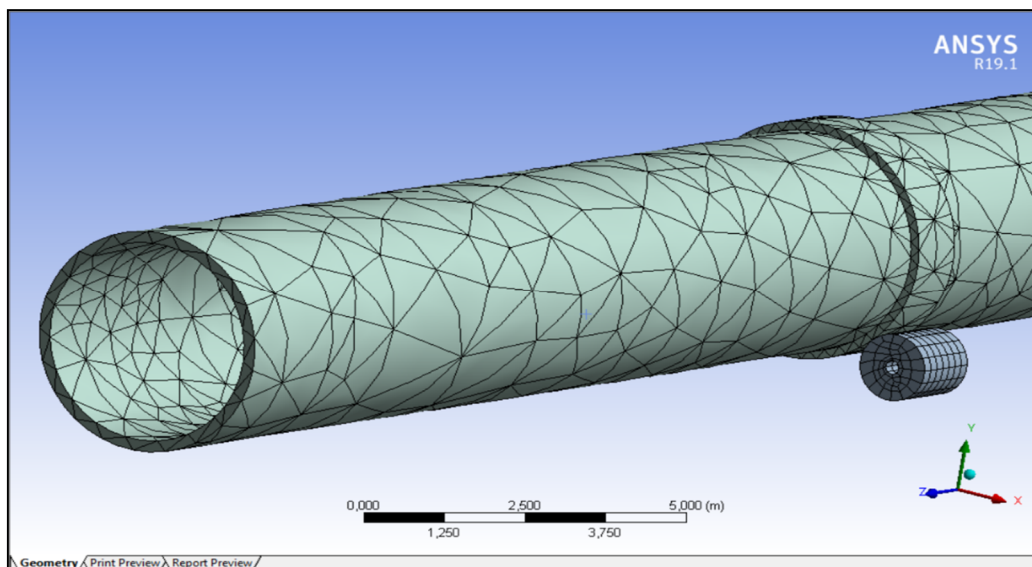


Рис. 4. Создание сетки

Далее задаем нагрузки и ограничение. В качестве инерционной нагрузки выставим стандартную земную гравитацию, и зададим скорость вращения печи 2 об/мин, что является средним показателем для данного параметра. Вращение с такой скоростью будет постоянным параметром, теперь зададим ограничение на перемещение. В

реальной конструкции у печи возможно два перемещения: в радиальном и тангенциальном направлении. Для фиксации перемещения в осевом направлении используются, для лёгких печей – обыкновенные упорные ролики, на тяжёлых – гидроупоры (рис. 5).

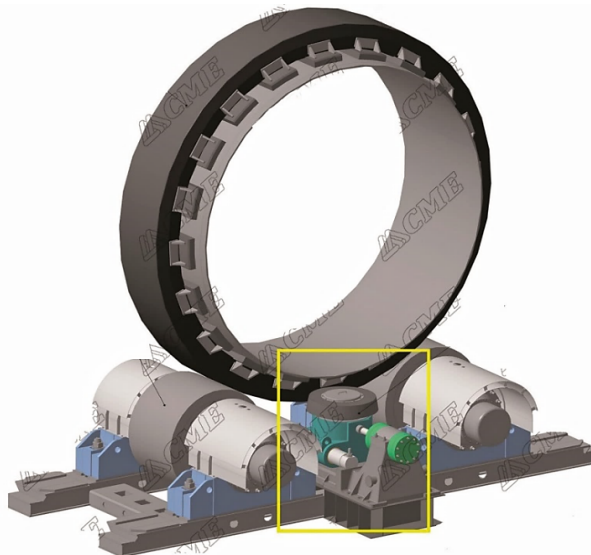


Рис. 5. Роликовые опоры с осевым фиксатором

В нашем случае используется как раз упорный ролик, а не гидроупор, но на суть закрепления это повлияет не значительно. Будем использовать из вкладки Support, ограничение типа Cylindricalsupport.

Применим данное закрепление к цилиндрической поверхности бандажей и условной поверхности венцового зубчатого колеса (рис. 6).

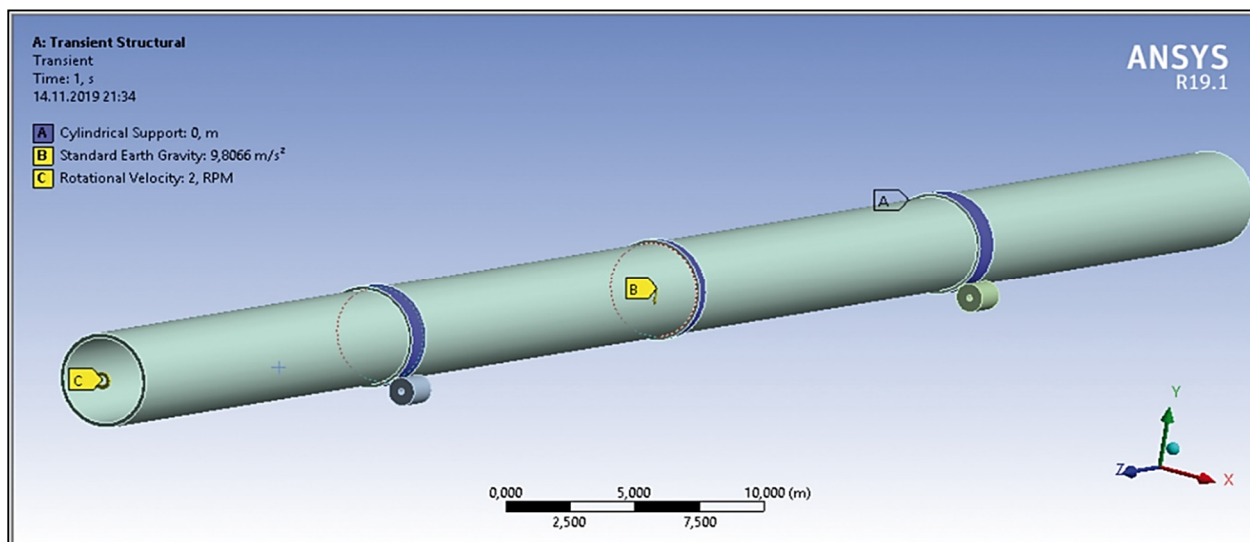


Рис. 6. Расчётная схема

После задания всех настроек, запускаем решатель, и видим, что даже при таком размере сетки, потребление ресурсов достаточно значительное.

Посмотрим после завершения расчёта на эквивалентные напряжения. По умолчанию используется четвёртая теория прочности – энергетическая. Значения напряжения вычисляются по критерию фон Мизеса [11–13]:

$$\sigma_{\text{Экв.}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \leq [\sigma] \tag{2}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальные напряжения на главных площадках, $[\sigma]$ – критические значения напряжения для данного материала (обычно предел текучести).

Большие значения напряжений при прогибе печи под собственным весом появляются из-за того, что правая опора, расположенная ближе к правому торцу печи, испытывает большие изгибающие моменты, что влечёт за собой наличие

концентрации напряжений, где торцевые поверхности ролика и бандажа лежат в одной плоскости и контактируют кромками. Та же ситуация и на роликах левой опоры, но напряжённое – деформированное состояние здесь значительно отличается и отсутствует сильно выраженная концентрация напряжений (рис. 7).

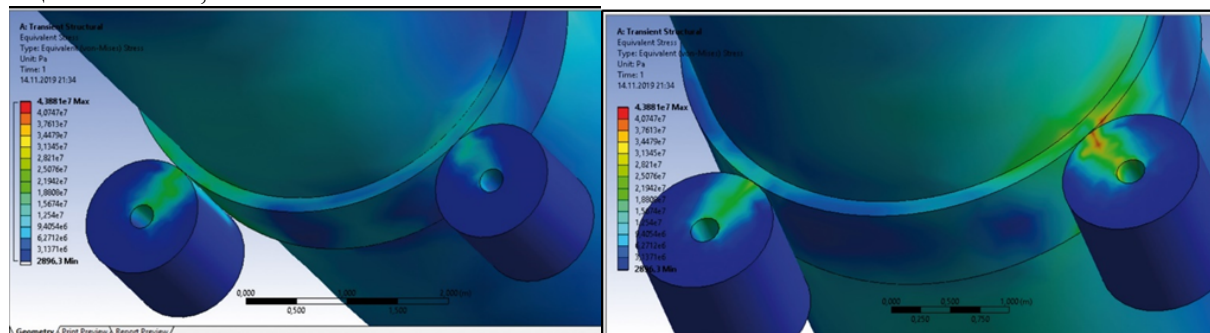


Рис. 7. Общая картина напряжений в зоне контакта левой и правой опоры

Видно, что напряжения на роликах левой и правой опоры различаются, помимо этого распределение их так же носит различный характер. Такое поведение зависит от различного расстояния опор от торцов печи и ассиметричного расположения роликов в боковой проекции. В случае левой опоры, один из роликов остаётся практически незагруженным, в случае же правой опоры, на той же стороне относительно оси печи, ролик загружен максимально.

Так как рассматривается переходный процесс, то значения тех или иных величин должны иметь нестационарный характер, то есть изменяться во времени. В случае статического изображения, в отличие от анимированного, определить функциональную зависимость во времени невозможно, поэтому иллюстрацией данной зависимости будут служить графики изменения этих величин [14–15]. Ниже (рис. 8), представлен график изменения эквивалентных напряжений во всей конструкции.

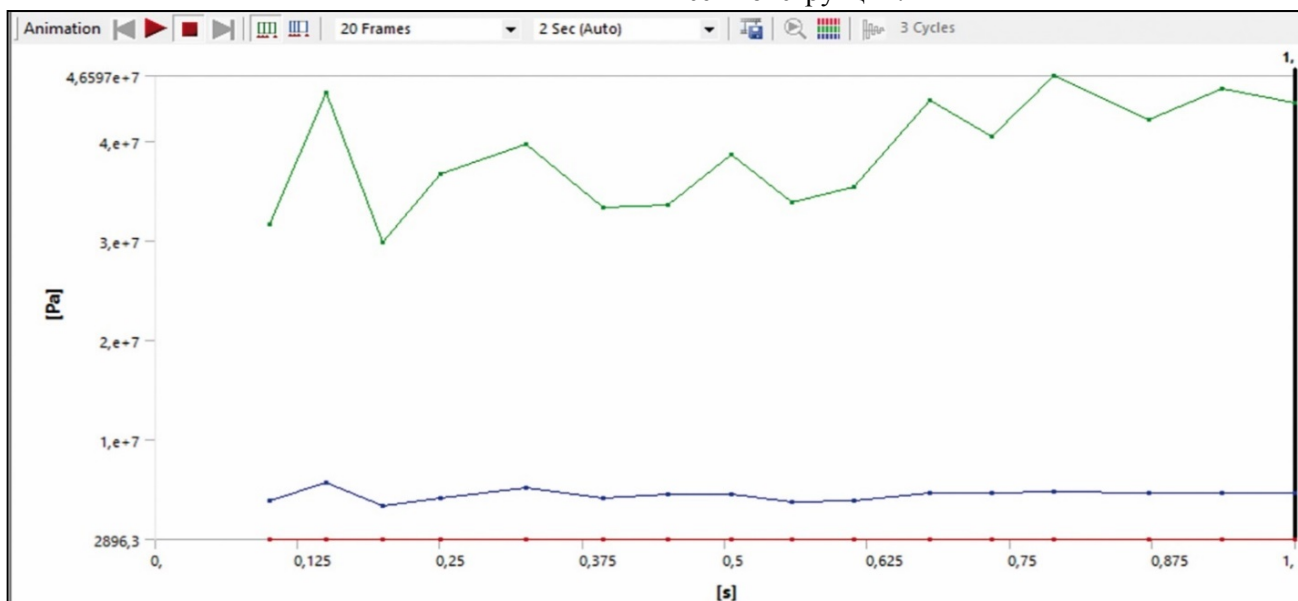


Рис. 8. Графики изменения эквивалентных напряжений

Любой переходный процесс, которому характерны «при старте» повышенные значения возникающих при напряжённо-деформированном состоянии величин, рано или поздно выходит на то или иное постоянное значение, которое незначительно колеблется относительно среднего. На графике зелёная линия. За время моделирования можно предположить, что достигнув максимального значения напряжения в 46 МПа, параметр выходит на постоянное значение около 40–42 МПа.

Важно отметить следующее, что при использовании в конструкции печи сварного бандажа, жёсткость и прочность конструкции значительно выше, чем при использовании бандажа плавающего. Однако это ведёт к тому, что бандажи, как и венцовое зубчатое колесо, в зоне сопряжения с поверхностью корпуса печи, и в зонах, находящихся на достаточно большом удалении от роликовой опоры, являются концентраторами напряжений (рис. 9).

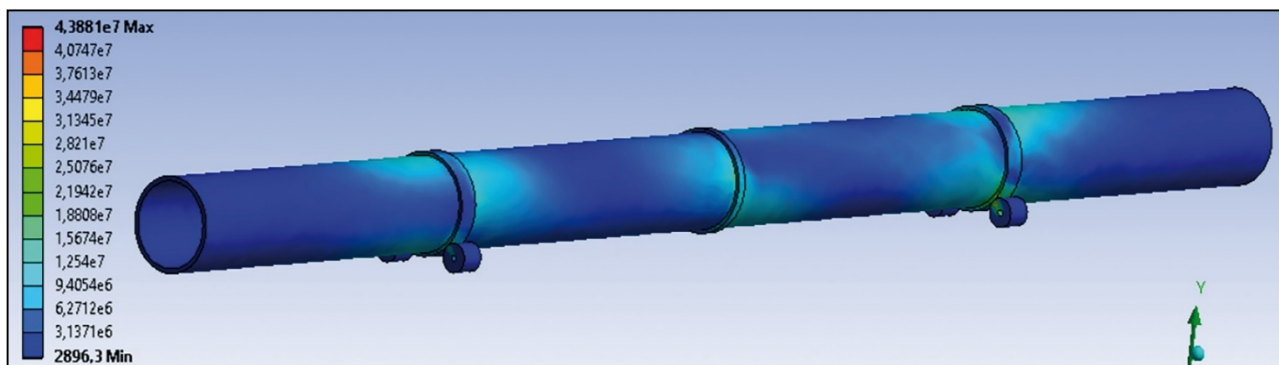


Рис. 9. Общий вид эквивалентных напряжений в конструкции печи

Далее, с помощью средства ContactTool, посмотрим, что происходит непосредственно в зоне контакта. Строим карты нормального давления в обеих опорах, выбрав характеристику напряжений Pressure. Как и в случае эквивалентных напряжений, ситуация подобная. Один из роликов левой опоры загружен очень мало, по сравнению с роликом правой опоры. Отчётливо можно заметить, по величине максимального давления,

формирование двух пятен контакта на трёх роликах из четырёх, на четвертом ролике разрыва пятна контакта не наблюдается. Характер изменения кривой нормального давления в роликах схож с графиком эквивалентных напряжений с максимальной амплитудой в 39 МПа (рис. 10), что говорит о существенном вкладе в напряжения вычисленные по критерию фон Мизеса.

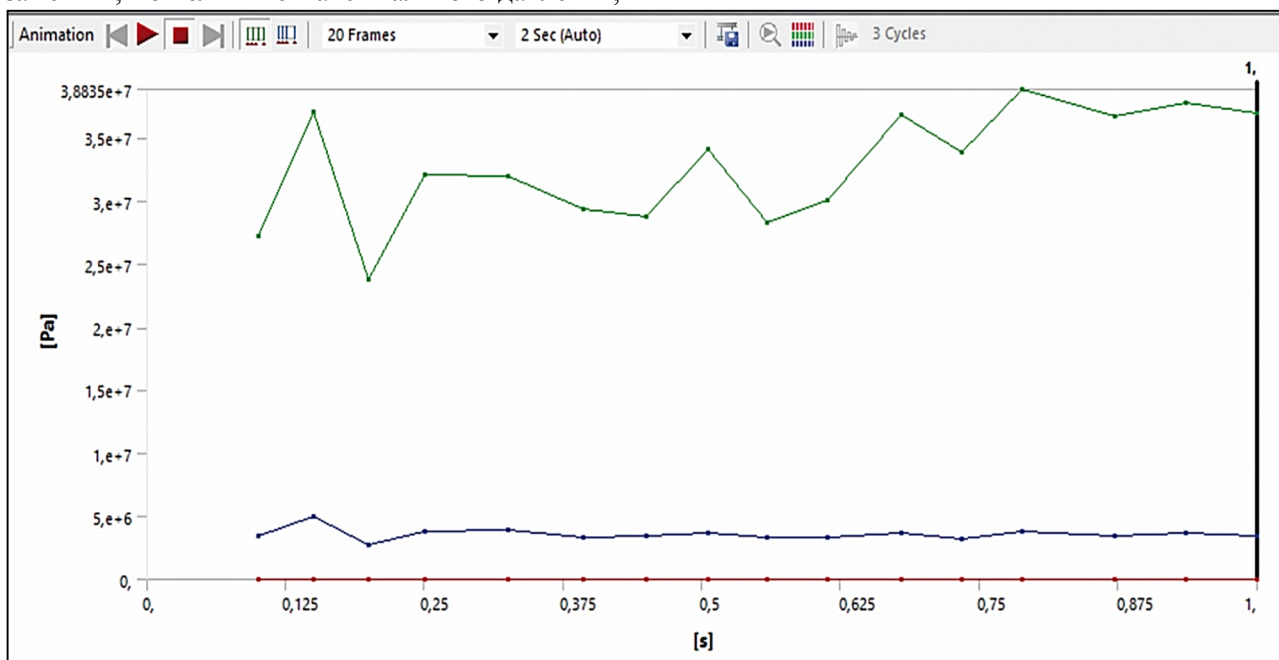


Рис. 10. Графики изменения контактного давления

Рассмотрим статус контакта (рис 11), который может принимать пять состояний (над ограничением, далеко, близко, скольжение, склеивание), видим, что присутствует частично скольжение, что в реальной конструкции в принципе практически не бывает, но задав в системе по умолчанию, небольшую величину, в последствии можно будет промоделировать износ поверхностей при резком пуске [16–17]. По этой причине, разгон печи осуществляется плавно, электродви-

гателями с возможностью постепенного изменения своих оборотов, так как для реального запуска печи на 2 об/мин, потребуется значительно большее количество энергии, для преодоления инерционных нагрузок, и привод передачи крутящего момента таких нагрузок может не выдержать. Но моделировать разгон задача достаточно сложная и ресурсозатратная, поэтому условно считаем, что моделирование происходит уже при установившемся режиме вращения печи.

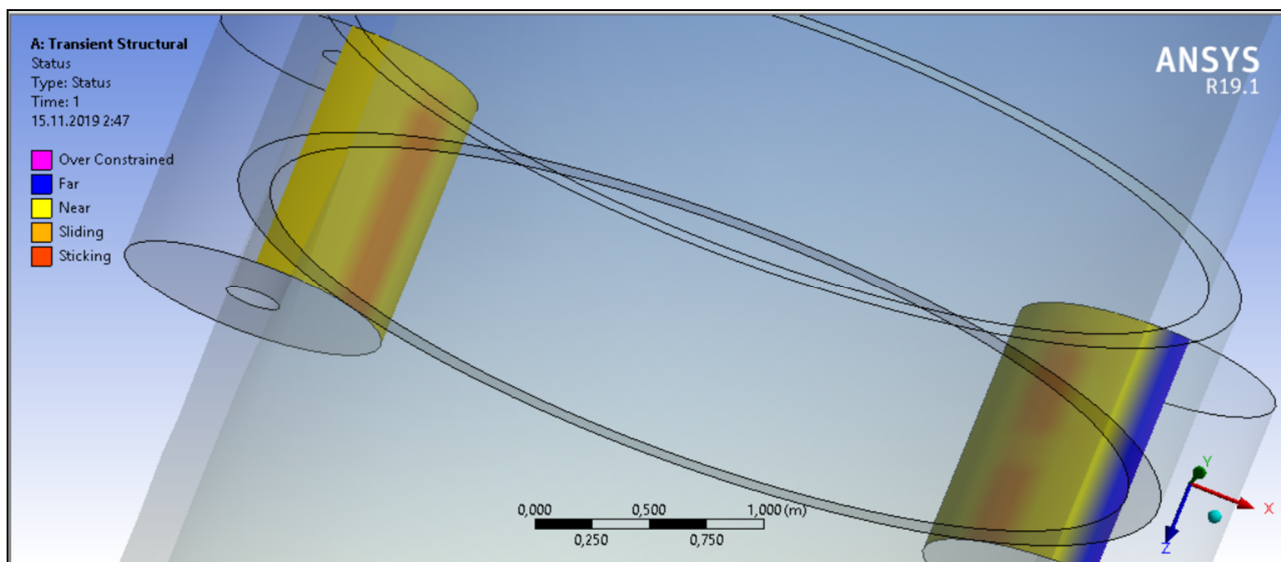


Рис. 11. Статус контактных пар

Напряжения, вызываемые касательными силами трениями, в результате проскальзывания и могут стать одной из причиной износа опорных роликов, нарушением его геометрической формы, появлением биения, что в свою очередь ведёт к повышенным нагрузкам на привод вращения печи даже при установившемся режиме работы [18].

Проведём модальный анализ, чтобы определить формы колебаний печи, а также частоты, на которых эти колебания происходят. Задаем в настройках вычисления первых двадцати форм колебаний и получим следующую диаграмму частот (рис. 12).

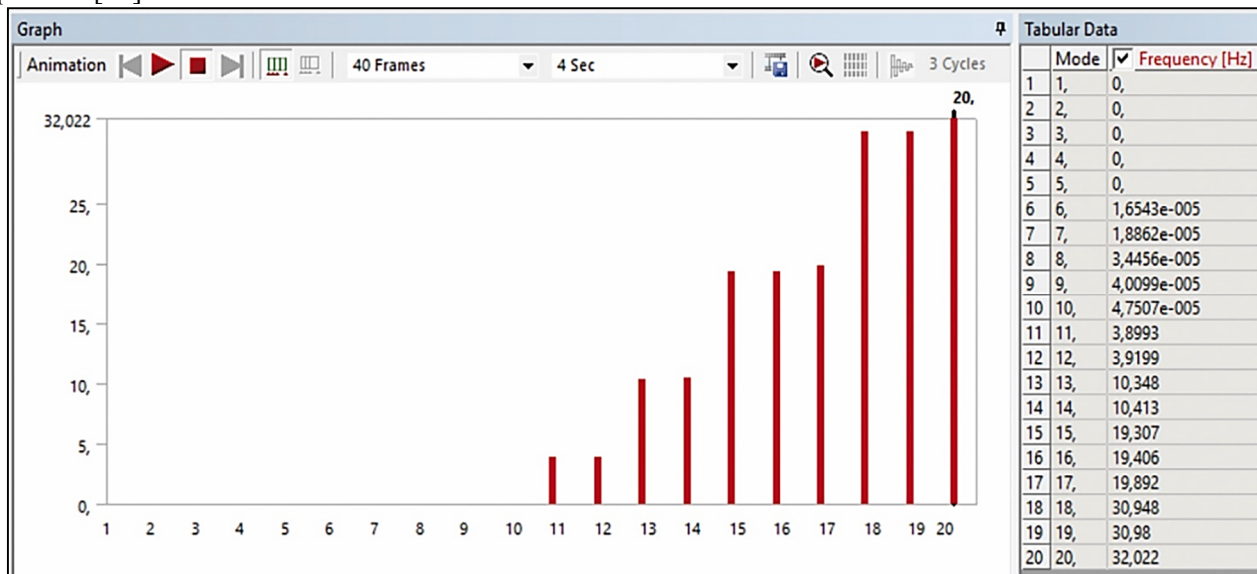


Рис. 12. Модально – частотная диаграмма

Видим, что первые 10 форм колебаний отсутствует, а на 20-ой форме частота составляет 32 Гц. Это говорит о том, что избежать разрушения при резонансе с другим работающим оборудованием невозможно. Частоты окружающей среды не должны совпадать или быть кратными рассчитанным частотам. Двадцати форм колебаний достаточно для данного расчёта, так как эффективная масса составила 97 %, что больше 90 %, а это значит, что мы учли все возможные формы колебаний, и у нас не осталось скрытых частот и неколеблющихся масс.

На самом деле, если посмотреть на значения перемещений, на каждой из форм с ненулевой частотой колебаний, то можно увидеть, что максимальные перемещения не превышают 1 мм, и поэтому даже попадая в резонанс, мгновенного разрушения не будет (рис. 13). Но не смотря на небольшие амплитуды колебаний, желательно соблюдать правило при проектировании, описанное выше. Либо провести дополнительные расчёты, которые подтверждают некоторое безопасное допущение резонанса.

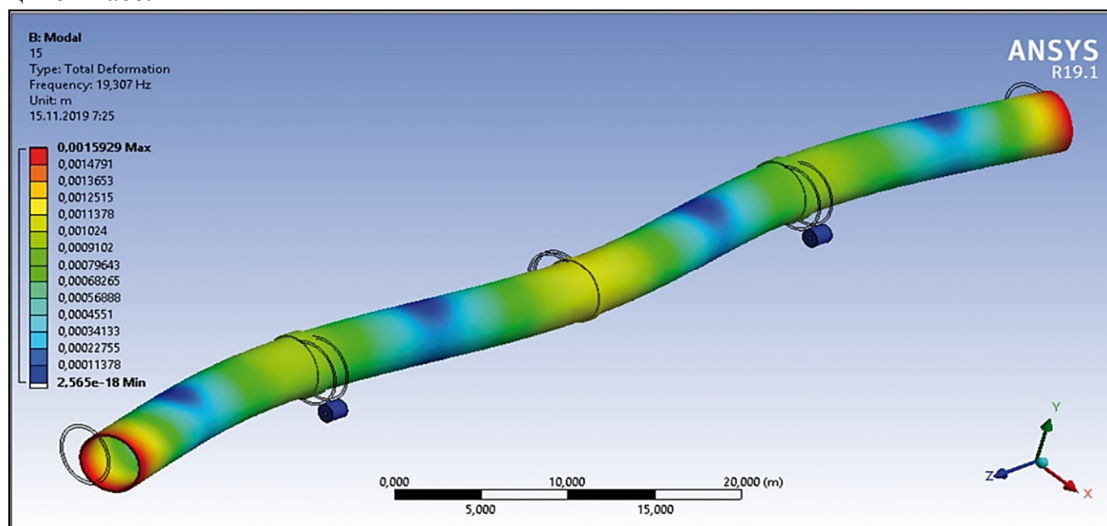


Рис. 13. Картина суммарных перемещений на частоте 19,3 Гц

Выводы: проведение анализа переходных процессов помогло выявить то, что невозможно получить обычным статическим расчётом. Изменяющиеся значения величин при напряжённо-деформированном состоянии объекта, в отличие от статических, могут значительно менять поведение конструкции, особенно крупногабаритных объектов, не говоря уже о том, что эти объекты могут работать на повышенных скоростях [19–20]. В нашем случае хоть и не наблюдается движения с высокими скоростями, но учтены инерционные нагрузки. Изучение контактного взаимодействия печи с роликовыми опорами в процессе вращения, позволило увидеть аномальные эффекты, которые могут возникнуть при неправильном конструктивном исполнении, либо при ошибке в монтаже и неправильном подходе к проектированию. Данная модель безусловно может быть дополнена другими элементами симуляции реальных конструктивных особенностей, такими как жёсткости подшипников, кинематической схемой плавающих бандажей, демпфирующих элементов, реальных гидравлических упоров и некоторых других. Всё это конечно потребует значительных вычислительных мощностей,

но тем не менее, позволит приблизить имитационную модель поведения конструкции к её реальному поведению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кхалифа М.М., Дуюн Т.А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечно-элементного пакета AnsysWorkbench // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 11. С. 121–127.
2. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 61–65.
3. Дуюн Т.А., Рубанов В.Г., Хуртасенко А.В., Гринек А.В., Кариков Е.Б., Лесунов М.Е. Математическое моделирование и оптимизация процессов механической обработки как средство управления технологическими параметрами на основе нечеткой логики // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводи-

мого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. Белгородский государственный технологический университет им. В.В. Шухова. 2015. С. 138–156.

4. Федоренко М.А. Лепестковое уплотнительное устройство для цементных вращающихся печей // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2008. № 4. С. 49–52.

5. Санина Т.М. Способ восстановления работоспособности внутренней поверхности цапфы крупногабаритного вращающегося оборудования в условиях эксплуатации // Белгород: БГТУ. 2011. 114 с.

6. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М., Смирных А.П., Якубенко А.Н. Анализ и пути совершенствования способов механической обработки крупногабаритных венцевых шестерен приводов вращающихся агрегатов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 11. С. 6–8.

7. Маркова О.В. Математическая модель оптимизации обработки цилиндрических поверхностей крупногабаритного вращающегося оборудования // «Труды Госнिति». 2015. Т. 119. С. 219–224.

8. Дуюн Т.А. Моделирование тепловых деформаций с целью обеспечения точности механической обработки // Вестник Брянского государственного технического университета. 2009. № 2 (22). С. 17–23.

9. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М., Маркова О.В. Технология восстановления работоспособности опорных бандажей вращающихся цементных печей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 1. С. 13–15.

10. Гологорский Е.Г., Доценко А.И., Ильин А.С. Эксплуатация и ремонт оборудования предприятий стройиндустрии // М.: Архитектура. 2006. 503 с.

11. Маркова О.В. Аулов В.Г., Лавренчук А.Н., Федоренко М.А. Анализ методов расчета износа контактных поверхностей трения // Международная научно-практическая конференция

студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и научно-технический прогресс», Губкин: Изд-во БГТУ, 2012. С. 65–69.

12. Маслова И.В., Лозовая С.Ю., Чепчуров М.С. Дистанционная диагностика состояния опорных деталей сушильных барабанов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 3. С. 653–658.

13. Иванов А.И., Малыгина Е.А., Вятчанин С.Е., Туреев С.В. Закон распределения критерия Крамера – Фон Мизеса для проверки гипотезы нормальности малых выборок // Электронные информационные системы. 2019. № 1. (20). С. 97–105.

14. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М., Маркова О. В. Привод вращения крупногабаритных агрегатов зубчатыми колесами // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 3. С. 15–17.

15. Корендясев Г.К. О Конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 1) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 2. С. 14–24.

16. Ozel T. The Influence of friction models on finite element simulations of machining // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. №1. Pp. 518–530.

17. Fedorenko M.A., Bondarenko Y.A., Sanina T.M., Markova O.V. Auxiliary machine for machining internal surfaces of large cylindrical type // Eng Technol. 2015. № 11. Pp. 27–28

18. Дуюн Т.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния коллектора электродвигателя с целью обеспечения надежности работы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. № 2 (154). С. 43–46.

19. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е. В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Юрайт, 2011. 550 с.

20. Bondarenko J.A., Duyun T.A., Bestuzheva O.V. Investigation of stresses and deformations of ball mill support axles taking into account the temperature field by numerical method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 945(1). № 012018.

Информация об авторах

Гетьман Юрий Александрович, аспирант кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Погонин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технология машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 20.02.2021 г.

© Гетьман Ю.А., Погонин А.А., Бондаренко Ю.А., 2021

***Getman Yu.A., Pogonin A.A., Bondarenko Yu.A.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**E-mail: mila.kholoshevskaya@mail.ru*

STUDY OF THE TRANSITION PROCESS OF OPERATION IN THE CONTACT INTERACTION OF THE ROTARY KILN AND THE SUPPORT ROLLERS IN ANSYSMECHANICAL

Abstract. *At first glance, a rotary kiln is a simple structural object, which is very widespread in the industry of processing and obtaining materials, both for construction and for other purposes. However, behind the external simplicity, there are complex chemical processes, mechanical, subtleties of the control system, the technology of manufacturing large-sized parts that are part of the general assembly and directly issues related to the design and modernization stage. The study of various regularities of mechanical processes associated with the theory of elasticity, kinematics and contact interactions is difficult even separately, especially when the processes run together. Studying the contact interaction of the kiln with roller supports allows to see the anomalous effects that can occur if the design is incorrect. In a specific case, it is necessary to observe how, under the action of external forces, time-varying deformations, displacements, of individual structural elements occur, which are of key functional importance in the operation of the equipment, in conditions of contact interaction of its individual parts, taking into account inertial loads and damping. The study of transition processes with changing force factors in time will allow to obtain the response of the structure to external influences.*

Keywords: *kiln, supports, stresses, construction, contact, vibrations, time, change.*

REFERENCES

1. Khalifa M.M., Duyun T.A. Modeling the process of cutting structural steel using the finite element package AnsysWorkbench [Modelirovaniye protsessa rezaniya konstruktsionnoy stali s ispol'zovaniyem konechno-elementnogo paketa AnsysWorkbench]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2019. No. 11. Pp. 121–127. (rus)
2. Duyun T.A., Grinek A.V., Sakharov D.V. Modeling and optimization of technological processes of manufacturing products using the method of dynamic programming [Modelirovaniye i optimizatsiya tekhnologicheskikh pro-tsessov izgotovleniya izdeliy s ispol'zovaniyem metoda dinamicheskogo programmirovaniya]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2013. No. 3. Pp. 61–65. (rus)
3. Duyun T.A., Rubanov V.G., Khurtasenko A.V., Grinek A.V., Karikov E.B., Lesunov M.E. Mathematical modeling and optimization of machining processes as a means of controlling technological parameters based on fuzzy logic [Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya protsessov mekhanicheskoy obrabotki kak sredstvo upravleniya tekhnologicheskimi parametrami na osnove nechetkoy logiki]. Regional scientific and technical conference following the results of the competition for oriented fundamental research on interdisciplinary topics, held by the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Belgorod Region. Belgorod State Technological University named after V.V. Shukhov. 2015. Pp. 138–156. (rus)
4. Fedorenko M. A. Petal sealing device for cement rotary kilns [Lepestkovoye uplotnitel'noye ustroystvo dlya tsementnykh vrashchayushchikhsya pechey]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov. 2008. No. 4. Pp. 49–52. (rus)
5. Sanina T.M. A method of restoring the performance of the inner surface of the pin of large rotating equipment under operating conditions [Sposob vosstanovleniya rabotosposobnosti vnutrenney poverkhnosti tsapfy krupnogabaritnogo vrashchayushchegosya oborudovaniya v usloviyakh ekspluatatsii]. Belgorod: BSTU. 2011. Pp. 114. (rus)
6. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu. A., Sanina T.M., Smirnykh A.P., Yakubenko A.N. Analysis and ways of improving the methods of mechanical processing of large-size ring gears of drives of rotating units [Analiz i puti sovershenstvovaniya sposobov mekhanicheskoy obrabotki krupnogabaritnykh ventsevnykh shesteren privodov vrashchayushchikhsya agregatov]. Repair, restoration, modernization. 2013. No. 11. Pp. 6–8. (rus)
7. Markova O.V. Mathematical model of optimization of processing of cylindrical surfaces of large-sized rotating equipment [Matematicheskaya model' optimizatsii obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostey krupnogabaritnogo vrashchayushchegosya oborudovaniya]. "Proceedings of Gosniti". 2015.V. 119. Pp. 219–224. (rus)
8. Duyun T.A. Simulation of thermal deformations to ensure machining accuracy [Modelirovaniye teplovykh deformatsiy s tsel'yu obespecheniya tochnosti mekhanicheskoy obrabotki]. Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2009. No. 2 (22). Pp. 17–23. (rus)
9. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Sanina T.M., Markova O.V. Technology of restoration of the working capacity of supporting bandages

of rotating cement kilns [Tekhnologiya voss-tanovleniya rabotosposobnosti opornykh bandazhey vrashchayushchikhsya tsementnykh pechey]. Repair, restoration, modernization. 2015. No. 1. Pp. 13–15. (rus)

10. Gologorsky E.G., Dotsenko A.I., Ilyin A.S. Operation and repair of equipment for construction industry enterprises. Architecture. 2006. Pp. 503. (rus)

11. Markova O.V., Aulov V.G., Lavrenchuk A.N., Fedorenko M.A. Analysis of methods for calculating the wear of contact surfaces of friction [Analiz metodov rascheta iznosa kontaknykh poverkhnostey treniya]. International scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Youth and scientific and technological progress", Gubkin: Publishing house of BSTU. 2012. Pp. 65–69. (rus)

12. Maslova I.V., Lozovaya S.Yu., Chepchurov M.S. Remote diagnostics of the condition of the supporting parts of the drying drums [Distsionnaya diagnostika sostoyaniya opornykh detaley sushil'nykh barabanov]. Bulletin of the Tambov State Technical University. 2013. T. 19. No. 3. Pp. 653–658. (rus)

13. Ivanov A.I., Malygina E.A., Vyatchanin S.E., Tureev S.V. The distribution law of the Kramer - Von Mises criterion for testing the hypothesis of normality of small samples [Zakon raspredeleniya kriteriya Kra-mera – Fon Mizesa dlya proverki gipotezy normal'nosti malykh vyborok]. Electronic information systems. 2019. No. 1. (20). Pp. 97–105. (rus)

14. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Sanina T.M., Markova O.V. Rotation drive of large-size units with gear wheels [Privod vrashcheniya krupno-

gabaritnykh agregatov zubchatymi kolesami]. Repair, restoration, modernization. 2015. No. 3. Pp. 15–17. (rus)

15. Korendyasev G.K. About Finite Element Modeling of Metal Cutting Process (Part 1) [O Konechnoelementnom modelirovanii protsessa obrabotki metallov rezaniyem (chast' 1)]. Scientific and technical development bulletin. 2015. No. 2. Pp. 14–24. (rus)

16. Ozel T. The Influence of friction models on finite element simulations of machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2006. No. 1. Pp. 518–530.

17. Fedorenko M.A., Bondarenko Y.A., Sanina T.M., Markova O.V. Auxiliary machine for machining internal surfaces of large cylindrical type. Eng Technol. 2015. No. 11. Pp. 27–28

18. Duyun T.A. Modeling the stress-strain state of an electric motor collector in order to ensure operational reliability [Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kollektora elektrodvigatelya s tsel'yu obespecheniya nadezhnosti raboty]. Proceedings of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. 2010. No. 2 (154). Pp. 43–46. (rus)

19. Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefanyuk E.V. Technical thermodynamics and heat transfer [Tekhnicheskaya termodinamika i teplope-redacha]. M.: Yurayt. 2011. 550 p. (rus)

20. Bondarenko J.A., Duyun T.A., Bestuzheva O.V. Investigation of stresses and deformations of ball mill support axles taking into account the temperature field by numerical method. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945(1). No. 012018.

Information about the authors

Hetman, Yuri A. Postgraduate student. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Pogonin, Anatoly A. DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Bondarenko, Julia A. DSc, Professor. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 20.02.2021

Для цитирования:

Гетьман Ю.А., Погонин А.А., Бондаренко Ю.А. Исследование переходного процесса эксплуатации при контактном взаимодействии барабанной печи и опорных роликов в ANSYSMECHANICAL // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 3. С. 107–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-107-117

For citation:

Getman Yu.A., Pogonin A.A., Bondarenko Yu.A. Study of the transition process of operation in the contact interaction of the rotary kiln and the support rollers in ANSYSMECHANICAL. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 3. Pp. 107–117. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-3-107-117