

На правах рукописи



БУЯНКИН ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПОВОРОТНЫХ ПЛАТФОРМ
ЭКСКАВАТОРОВ-МЕХЛОПАТ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Кемерово - 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ Богомолов Игорь Дмитриевич

Официальные оппоненты:
Гилев Анатолий Владимирович

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой «Горные машины и комплексы»;

Доронин Сергей Владимирович

кандидат технических наук, доцент, Красноярский научный центр СО РАН, зав. лабораторией механики деформирования и разрушения СКТБ «Наука».

Ведущая организация – ЗАО «Стройсервис» (г. Кемерово)

Защита состоится 28.05.2015 года в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс: (3842) 58-33-80, e-mail: siyu.eav@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» и на сайте <http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/>

Автореферат разослан « » апреля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Семыкина
Ирина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Современные открытые горные работы невозможны без использования выемочно-погрузочного оборудования, являющегося неотъемлемым звеном технологической цепочки. Развитие открытого способа добычи полезных ископаемых в настоящее время идет по пути концентрации горных работ, увеличения единичной мощности одноковшовых экскаваторов-мехлопат, но вместе с тем и с отставанием процессов обновления экскаваторного парка.

Тяжелые условия работы выемочно-погрузочного оборудования связаны с нестабильностью горнотехнических условий, знакопеременными нагрузками и износом элементов оборудования

Острота проблемы повышения надежности и качества обслуживания оборудования экскаваторов-мехлопат обуславливается циклическим характером производства, где в большинстве случаев эти машины являются основным звеном всего технологического процесса.

Опорно-поворотное устройство является одним из важнейших узлов экскаватора-мехлопаты, определяющим надежную и безопасную эксплуатацию машины в целом. Вместе с этим устойчивость поворотных платформ и нагрузки в опорно-поворотных устройствах в различных условиях недостаточно полно исследованы и отражены в научно-технической литературе.

Отсутствие учета движения центра массы механической системы поворотной платформы за время черпания приводит к недостаточно точному определению устойчивости поворотной платформы.

Имеющиеся научно-технические подходы не учитывают усилия резания и напора при расчете нагрузок, возникающих в процессе черпания и определяющих напряженно-деформированное состояние опорно-поворотных устройств.

Существующие системы контроля работы экскаваторов-мехлопат, несмотря на их многообразие и технические возможности, не ограничивают работу машины при превышении предельного угла наклона. Поэтому решение о дальнейшей эксплуатации в этих условиях принимается машинистом экскаватора, что приводит к возникновению дополнительных нагрузок в опорно-поворотных устройствах.

Одним из направлений решения задачи повышения надежности опорно-поворотных устройств экскаваторов-мехлопат является обеспечение устойчивости платформ и снижение уровня нагруженности и за счет применения технических решений, увеличивающих техническую готовность оборудования.

Повышение технической готовности оборудования горного производства увеличит производительность труда, что соответствует выполнению требований Указа Президента России от 07.05.2012 №596 «О долгосрочной государственной экономической политике».

Таким образом, исследование устойчивости платформ и нагруженности опорно-поворотных устройств экскаваторов-мехлопат и повышение надежности за счет применения новых устройств и конструкций является актуальной научной задачей.

Объект исследования – опорно-поворотное устройство экскаваторов-мехлопат в различных условиях его нагружения.

Цель работы состоит в повышении эффективности эксплуатации опорно-поворотных устройств экскаваторов-мехлопат с учетом возможных нагрузок при обеспечении устойчивости платформы.

Идея работы – обеспечение оперативного контроля потери устойчивости поворотной платформы при эксплуатации экскаватора-мехлопаты.

Основные задачи исследований:

1. Проанализировать состояние экскаваторного парка, конструкции опорно-поворотных устройств и устройств контроля угла наклона на примере экскаваторов-мехлопат ОАО «УК «Кузбассразрезуголь».

2. Исследовать отказы элементов опорно-поворотных устройств экскаваторов-мехлопат и причины наклона поворотной платформы.

3. Определить параметры устойчивости поворотной платформы экскаваторов-мехлопат и оценить ее воздействие на опорно-поворотное устройство.

4. Разработать модель нагружения конструктивных элементов опорно-поворотных устройств.

5. Обосновать и разработать технические решения по обеспечению допустимых параметров нагружения опорно-поворотных устройств и контролю устойчивости поворотной платформы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Положение центра масс механической системы поворотной платформы экскаватора-мехлопаты в пространстве должно определяться с учетом траектории движения ковша и рукояти, степени наполнения ковша горной массой за время черпания и при наклоне платформы более 4 градусов может привести к потере ее устойчивости.

2. Нагрузки в опорно-поворотном устройстве, в том числе отрывающее усилие на цапфе, зависят от времени черпания, усилий резания и напора, траектории движения центра масс платформы и угла ее наклона и носят знакопеременный характер. При потере устойчивости платформы происходит перераспределение вертикальной нагрузки с роликов на центральную цапфу.

3. Использование разработанного устройства контроля угла наклона и блокирования подъемного механизма позволяет рационально перераспределить напряжения в узлах опорно-поворотного устройства за счет взаимодействия горизонтальной нагрузки и изгибающего момента на центральную цапфу, вертикальной нагрузки на верхний рельс, а также обеспечить контроль устойчивости поворотной платформы.

Научная новизна исследований:

- определены координаты центра масс механической системы поворотной части экскаватора-мехлопаты как функция от времени, зависящие от движения и степени наполнения ковша горной массой при черпании;

- получены зависимости отрывающего усилия на центральной цапфе и нагрузок в опорно-поворотном устройстве от времени черпания с учетом усилий резания и напора, движения центра масс поворотной части при черпании,

при наличии угла наклона, определяющие условия устойчивости поворотной платформы;

- установлены, на основе анализа построенной методом конечных элементов модели напряженно-деформированного состояния, наиболее нагруженные элементы и разработаны технические решения по снижению влияния нагрузок и устойчивости поворотной платформы на узлы опорно-поворотного устройства для повышения их надежности.

В ходе выполнения работы **использована следующая методология и комплекс методов исследования, включающие:**

- натурные методы исследований и методы математической статистики при обработке материала;
- силовой и кинематический анализы методами теоретической механики, аналитические методы расчетов нагрузок;
- компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния с помощью метода конечных элементов.

Степень достоверности научных положений, выводов и результатов исследований подтверждается корректным использованием аналитических методов расчета нагрузок; удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также моделирования, относительное расхождение между которыми не превышает 8 %.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке последовательности определения устойчивости платформы и расчете нагрузок в опорно-поворотном устройстве;
- в обосновании и разработке устройства контроля угла наклона и блокировки подъемного механизма, что обеспечивает устойчивость платформы и увеличивает надежность опорно-поворотного устройства за счет исключения экскавации с превышением допустимого угла наклона поворотной платформы;
- в рационализации конструкции центральной цапфы, определенной по результатам моделирования напряженно-деформированного состояния опорно-поворотного устройства.

Реализация работы

Теоретические и методические положения, разработанные в ходе диссертационных исследований, изложены во «Временной инструкции по оценке долговечности и остаточного ресурса металлоконструкций экскаваторов, продления межремонтных сроков их работы и сроков безопасной эксплуатации» (Кемерово, 2007) и «Методических указаниях по проведению экспертизы промышленной безопасности одноковшовых экскаваторов для предприятий Кузбасса» (Кемерово-Новокузнецк, 2008).

Практические результаты переданы для реализации заводу-изготовителю экскаваторов ЭКГ-10 ООО «ИЗ-КАРТЭКС им. П.Г. Коробкова». Устройство контроля угла наклона и блокирования механизма подъема ковша испытано в филиале ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез». Предложенный комплекс научно-технических решений повышает уровень долговечности и безотказности работы опорно-поворотных устройств и безопасности эксплуатации экскаваторов.

Апробация работы. Основное содержание работы, отдельные её положения и результаты были доложены и обсуждены на: Международных научно-практических конференциях «Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах» (2005), Региональных конференциях на базе КузГТУ в 2005, 2008, 2009 гг., «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири («Сибресурс-2008», 2008), «Энергетическая безопасность России: Новые подходы к развитию угольной промышленности» (Кемерово, 2007, 2009, 2013 гг.); Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2014» (Москва, 2014 г.).

Ряд работ, выполненных с участием автора и включающих основные результаты диссертации, удостоены дипломов международной выставки-ярмарки «ЭКСПО-УГОЛЬ» за лучшие доклады (2007, 2012, 2013 гг.).

Публикации. Основные научные результаты опубликованы в шестнадцати работах, в том числе в четырех из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и идеи работы, постановке задач исследований, выборе методов исследований, анализе полученных результатов и подготовке на их основе расчетов и разработке рекомендаций, а также в участии в публикациях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, словаря терминов, списка литературы из 83 наименований. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, в том числе содержит 68 рисунков, 24 таблицы и 3 приложения на 6 страницах.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность за помощь при работе над диссертацией д.т.н., проф. Хорешку А.А., к.т.н., доц. Е.К. Соколовой и к.т.н., доц. А.В. Воробьеву, а также коллективу кафедры «Горных машин и комплексов» за оказанное внимание и ценные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, сформулированы цель, идея, научные положения и новизна, а также практическая ценность работы.

В первой главе рассмотрено состояние и проблемы использования одноковшовых экскаваторов на угольных разрезах Кузбасса.

В настоящее время основным угледобывающим регионом в России является Кузбасс, на открытых горных работах которого добывается 70% от объема добычи в районе и 57% от добычи угля в стране.

Успешное развитие открытых горных работ неразрывно связано с совершенствованием выемочно-погрузочного оборудования, повышением его производительности при одновременном снижении затрат на содержание и ремонт и, в конечном счете, удельных затрат на экскавацию горной массы.

Достигнутый уровень эффективности и дальнейшее развитие экскаваторной техники и технологии на разрезах и карьерах связаны с работами Н.Г. Домбровского, Е.Р. Петерса, С.А. Панкратова, А.Н. Зеленина, Ю.А. Ветрова, В.Р. Кубачека, Д.П. Волкова, Ю.И. Белякова, Р.Ю. Подэрни, А.А. Хорешка, И.Д. Богомолова, И.А. Паначева, М.Ю. Насонова.

Несмотря на необходимость своевременного обновления парка экскаваторов, на предприятиях Кузбасса по добыче угля открытым способом эксплуатируется большое количество экскаваторов-мехлопат, отработавших нормативный ресурс как по сроку эксплуатации, так и по наработке.

Увеличение сроков эксплуатации и снижение процессов обновления экскаваторного парка приводят к увеличению внеплановых простоев. Анализ этих простоев показал, что опорно-поворотное устройство является одним из часто отказывающихся узлов, при этом среднее время восстановления работоспособности составляет в среднем 48 часов.

Изучение особенностей эксплуатации экскаваторов-мехлопат ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» (экскаваторов) и их опорно-поворотных устройств (ОПУ) позволило установить, что при плановых обслуживании уделяется недостаточно времени на контроль и регулировки из-за трудности доступа. Замену некоторых изношенных и сломанных элементов необходимо также выполнять в стесненных условиях с привлечением квалифицированных специалистов с использованием специального оборудования. Экскавация горной массы выполняется при постоянном наличии наклона поворотной платформы.

Известно, что на предприятиях ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» эксплуатируются экскаваторы-мехлопаты практически всех марок, выпускаемых как в России, так и за рубежом. На этих машинах применяется 5 основных типов конструкций ОПУ, каждая из которых имеет центральную цапфу, однорядный роликовый круг, верхний и нижний рельсы.

Анализ существующих устройств контроля угла наклона экскаваторов показывает, что они выполняют функции указателей и сигнализаторов и при превышении допустимых значений наклона работу машин не ограничивают.

Существующие расчетные подходы по определению нагруженности ОПУ сведены к определению вертикальных нагрузок на роликовый круг и отрывающего усилия на центральной цапфе. Эти расчеты являются статическими, а влияние возможных эксплуатационных нагрузок учитывается динамическим коэффициентом $K_{дин} = 2$ и коэффициентом запаса прочности детали.

Известны научные работы отечественных ученых посвященные исследованиям влияния грансостава горной массы, температуры окружающей среды, сейсмического воздействия и ветровой нагрузки на надежность и долговечность несущих металлоконструкций (прежде всего рабочего оборудования) одноковшовых экскаваторов. Однако исследования нагруженности опорно-поворотных устройств этих экскаваторов в различных условиях выполнены не достаточно полно.

При анализе научно-технических подходов установлено, что для определения нагруженности опорно-поворотных устройств и устойчивости поворотных платформ экскаваторов-мехлопат недостаточно полно учитывались: перемещение центра масс поворотной платформы, усилия резания и напора, а также углы наклона поворотной платформы.

Исследования причин наклона поворотной платформы экскаваторов и оценка его влияния выполнены не в полной мере и требуют продолжения.

В результате анализа состояния вопроса сформулированы цель, идея и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы и свидетель-

ствующие об актуальности исследований напряженности опорно-поворотных устройств в различных условиях.

Во второй главе описан механизм воздействия эксплуатационных нагрузок на элементы опорно-поворотного устройства.

В результате экспериментальных исследований, выполненных в ходе экспертизы промышленной безопасности оборудования, установлены два наиболее ответственных узла: верхний рельс и центральная цапфа. Их отказы влияют на безопасную эксплуатацию, восстановление их работоспособности наиболее длительно.

Визуальный осмотр и измерительный контроль верхнего рельса показал, что наибольшему износу подвержена передняя часть по длине пяти роликов.

Согласно законам трибологии известно, что износ элемента в конкретной точке в большей степени зависит от нагрузки в его сечении, при этом обратно пропорционален твердости и зависит также от перемещения и трения. Исходя из этого установлено, что износ рельса в конкретной точке прямо пропорционален восприятию удельной нагрузки $N_{уд}$ в данном месте.

В результате измерений установлено, что отпечаток контакта роликов и рельса имеет прямоугольную форму, поэтому в работе принято, что изношенный участок выражен через пятно контакта ролика и рельса.

Эти факты подтверждают наличие максимальных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации, а также определяют условие устойчивости платформы и подтверждают перераспределение нагрузок.

Рассмотрение повреждений центральной цапфы показало, что ее износ выражается в виде изнашивания по поверхностям трения и излома верхней части. Для уточнения причин излома выполнен фрактографический анализ его поверхности, установивший характер и направление развития дефектов в виде вязкого и хрупкого разрушения. Это свидетельствует о потере устойчивости платформы, которая происходит из-за перераспределения вертикальных нагрузок на роликах ОПУ и влияет на уровень отрывающих нагрузок на центральной цапфе.

Значения возможных углов наклона поворотной платформы и экскаватора в целом определены в результате многолетних наблюдений за эксплуатацией экскаваторов и при проведении экспертизы промышленной безопасности как новых машин, так и отработавших нормативные сроки службы.

В ходе исследований экскаваторов установлено, что при черпании продольный наклон платформы и экскаватора в целом - $\alpha_{общ}$ может составлять 12 градусов. Установлены три основные причины наклона: наклон рабочей площадки (до 7 град); наклон машины из-за проседания грунта (до 3,7 град); наклон платформы из-за увеличенных зазоров ОПУ (до 1,3 град). Поперечный наклон β наблюдался не так часто как продольный, поэтому описание причин его возникновения не приведено, однако его возможные значения (до 5 градусов) учитываются в аналитической части работы.

Влияние внешних факторов (условий эксплуатации) на нагруженность ОПУ в расчетах принималось при максимальных усилиях резания и напора. Они всегда имеются при черпании, так как экскаваторами разрабатываются горные породы с различными физико-механическими характеристиками в раз-

нообразных забоях. Значения этих усилий определяются параметрам приводов механизмов подъема и напора, максимальные величины ограничиваются стопорными токами их двигателей и постоянны в любом забое и в любое время года. Также в качестве внешних факторов, влияние которых на нагруженность ОПУ ранее не учитывалось, приняты углы продольного и поперечного наклона платформы и экскаватора в целом.

Для оценки влияния усилий резания и напора, наклона платформы на нагруженность ОПУ разработана последовательность определения траектории движения центра масс платформы и расчета нагрузок, возникающих при работе, выполненная на основании схемы расположения экскаватора ЭКГ-10 (рис. 1).

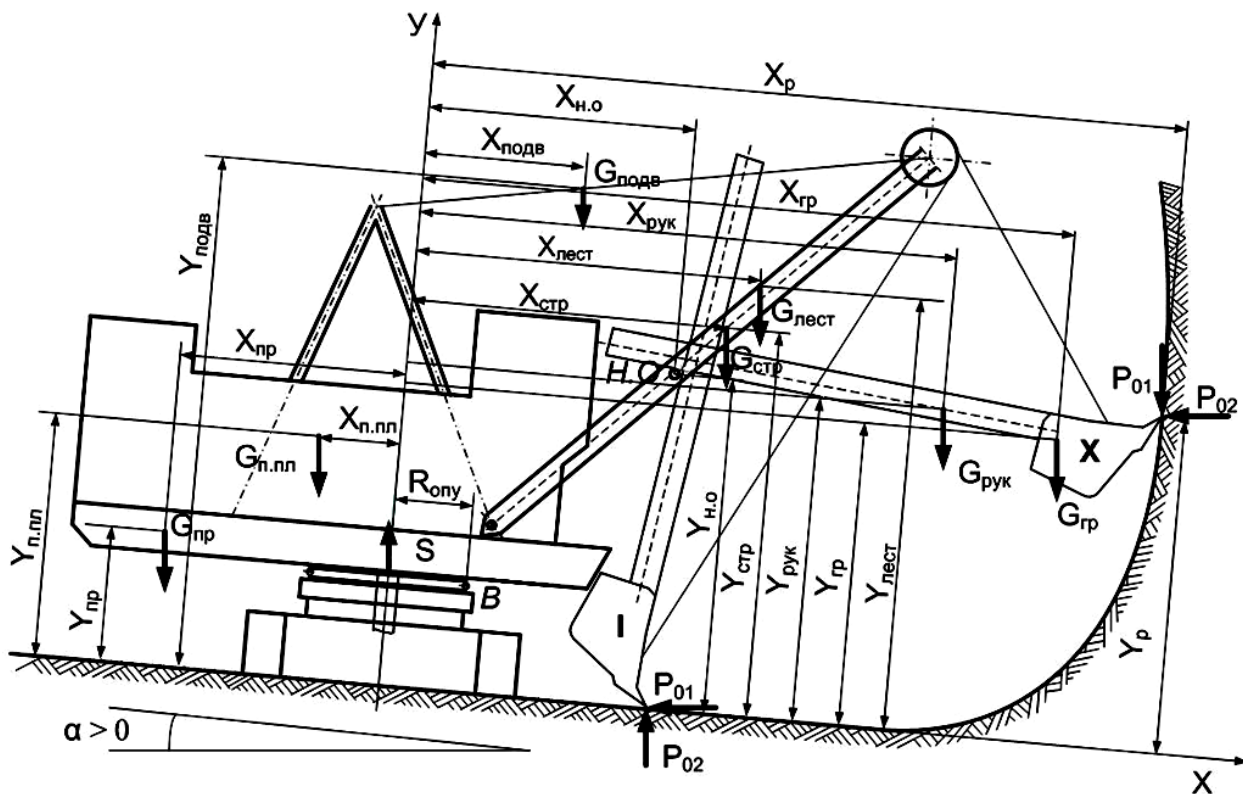


Рисунок 1 - Схема расположения элементов экскаватора ЭКГ-10 при определении нагрузок на его опорно-поворотное устройство

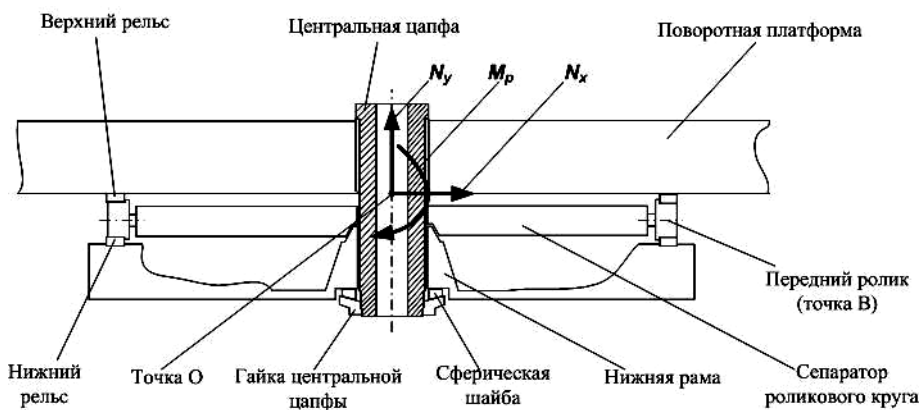


Рисунок 2 - Схема общей конструкции опорно-поворотного устройства и расположения реакций связей

На рис. 1, 2 и в последующих формулах приведены следующие обозначения: $G_{пр}$, $G_{п.пл.}$, $G_{подв}$, $G_{стр}$, $G_{лест}$, $G_{рук}$, $G_{гр i}$ – массы противовеса, поворотной платформы с расположенным на ней оборудованием, подвески стрелы (канаты, подкосы и пр.), лестницы стрелы, ковша с подвеской и рукоятки, вес грунта в i -м положении ковша за время черпания ($i = 1 \dots 10$) соответственно, G – сила тяжести механической системы, $X_{пр}$, $X_{п.пл.}$, $X_{подв}$, $X_{стр}$, $X_{лест}$, $X_{рук}$, $X_{гр i}$, X_G , $Y_{пр}$, $Y_{п.пл.}$, $Y_{подв}$, $Y_{стр}$, $Y_{лест}$, $Y_{рук}$, $Y_{гр i}$, Y_G – координаты центра масс противовеса, поворотной платформы с расположенным на ней оборудованием, подвески стрелы, лестницы стрелы, ковша с подвеской и рукоятки, а также механической системы соответственно, $X_{н.о.}$ и $Y_{н.о.}$ – координаты напорной оси, X_p и Y_p – координаты точки приложения точки резания P_{01} и усилия напора P_{02} , S – отрывающее усилие в центральной цапфе, $R_{опу}$ – радиус роликового круга, B – место (точка) расположения переднего ролика, α – угол наклона в продольном направлении, N_x – сумма горизонтальных нагрузок, N_y – сумма вертикальных нагрузок, M_p – изгибающий (реактивный) момент. На рис. 1, 2 не показаны: β – угол наклона в поперечном направлении и dK/dt – количество движения механической системы, зависящей от движения ковша и рукоятки и наполнения ковша горной массой, $G_{гр}^{max}$ – максимальный вес грунта в ковше, $K_{zi} = 0,1 \dots 1$ – коэффициент заполнения ковша грунтом в его i -м положении ($i = 1 \dots 10$), $l^{рук}_{н.о.}$ – расстояние от центра массы рукоятки до напорной оси, V – скорость выдвигания рукоятки, $l^{гр}_{н.о.}$ – расстояние от центра массы грунта в ковше до напорной оси, ω – угловая скорость поворота ковша и рукоятки относительно напорной оси, a – расстояние от зуба до центра массы ковша, t – время черпания.

Последовательность расчета и основные аналитические зависимости следующие.

1. Координаты центра масс (центра тяжести) механической системы платформы экскаватора впервые определены с учетом траектории движения ковша и рукоятки, а также степени наполнения ковша горной массой при черпании:

$$X_{C_i} = \frac{(X_{пр} \cdot G_{пр} + X_{п.пл.} \cdot G_{п.пл.} + X_{подв} \cdot G_{подв} + X_{стр} \cdot G_{стр} + X_{лест} \cdot G_{лест} + X_{рук} \cdot G_{рук} + X_{гр_i} \cdot G_{гр_i})}{G}, \quad (1)$$

$$Y_{C_i} = \frac{(Y_{пр} \cdot G_{пр} + Y_{п.пл.} \cdot G_{п.пл.} + Y_{подв} \cdot G_{подв} + Y_{стр} \cdot G_{стр} + Y_{лест} \cdot G_{лест} + Y_{рук} \cdot G_{рук} + Y_{гр_i} \cdot G_{гр_i})}{G}. \quad (2)$$

2. Вес грунта в ковше:

$$G_{гр_i} = G_{гр}^{max} \cdot K_{zi}. \quad (3)$$

3. Координаты центра тяжести рукоятки и ковша в i -м положении за время черпания:

$$X_{гр_i} = X_{н.о.} + (V \cdot t_i + l^{гр}_{н.о.}) \sin \omega t_i, \quad (4)$$

$$Y_{гр_i} = Y_{н.о.} - (V \cdot t_i + l^{гр}_{н.о.}) \cos \omega t_i. \quad (5)$$

4. Координаты центра тяжести грунта в ковше в i -том положении за время черпания:

$$X_{рук} = X_{н.о.} + (V \cdot t_i + l^{рук}_{н.о.}) \sin \omega t_i, \quad (6)$$

$$Y_{рук} = Y_{н.о.} - (V \cdot t_i + l^{рук}_{н.о.}) \cos \omega t_i. \quad (7)$$

5. Координата X_{G_i} точки пересечения линии действия силы тяжести платформы G с роликовым кругом определена при наличии наклона. В случае потери устойчивости передний ролик (точка B) является ребром опрокидывания

$$X_{G_i} = X_{C_i} + Y_{C_i} \cdot \operatorname{tg} \alpha . \quad (8)$$

6. Потеря устойчивости приводит к увеличению отрывающего усилия S в центральной цапфе, определенного с учетом времени черпания, усилий резания и напора, наклона платформы

$$\begin{aligned} S_i = & -\frac{1}{1,9} [G \cdot [(1,9 - X_{C_i}) \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - Y_{C_i} \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta] + \\ & + (X_p - 1,9)((-P_{01} \cdot \sin(\omega t_i) + P_{02} \cdot \cos(\omega t_i)) + \\ & + Y_p (P_{01} \cdot \cos(\omega t_i) + P_{02} \cdot \sin(\omega t_i))) \end{aligned} \quad (9)$$

7. Определение параметров нагружения элементов ОПУ:

7.1. Сумма горизонтальных нагрузок N_x

$$\begin{aligned} N_x = & \sum N_x^{\text{ст}} + \sum N_x^{\text{дин}} = (-\sum G_{ix}) - (P_{01x} + P_{02x} - \frac{dK_x}{dt}) = -\sum G_{ix} - P_{01x} - P_{02x} + \frac{dK_x}{dt} = \\ & = -[G_{\text{пр}} + G_{\text{п.пл.}} + G_{\text{подв}} + G_{\text{стр}} + G_{\text{лест}} + G_{\text{рук}} + K_3 \cdot t] \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta - \\ & - P_{01} \cdot \cos(\omega t_i) - P_{02} \cdot \sin(\omega t_i) + K_3 [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}} + a) \omega \cdot \cos(\omega t_i) + V \cdot \sin(\omega t_i)] + \\ & + K_3 \cdot t [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}} + a) (-\omega^2 \cdot \sin(\omega t_i) + 2V\omega \cdot \cos(\omega t_i)) \\ & + G_{\text{рук}} [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}}) (-\omega^2 \sin(\omega t_i)) + 2V\omega \cdot \cos(\omega t_i)] \end{aligned} \quad (10)$$

7.2. Сумма вертикальных нагрузок N_y

$$\begin{aligned} N_y = & \sum N_y^{\text{ст}} + \sum N_y^{\text{дин}} = (-\sum G_{iy}) - (P_{01y} + P_{02y} - \frac{dK_y}{dt}) = -\sum G_{iy} - P_{01y} - P_{02y} + \frac{dK_y}{dt} = \\ & = [G_{\text{пр}} + G_{\text{п.пл.}} + G_{\text{подв}} + G_{\text{стр}} + G_{\text{лест}} + G_{\text{рук}} + K_3 \cdot t] \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta - \\ & - P_{01} \sin(\omega t_i) - P_{02} \cos(\omega t_i) + K_3 [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}} + a) \omega \cdot \sin(\omega t_i) - V \cos(\omega t_i)] + \\ & + K_3 \cdot t [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}} + a) \omega^2 \cos(\omega t_i) + 2V\omega \cdot \sin(\omega t_i)] + \\ & + G_{\text{рук}} [(V \cdot t + l^{\text{рук}}_{\text{н.о.}}) \omega^2 \cos(\omega t_i) + 2V\omega \cdot \sin(\omega t_i)] \end{aligned} \quad (11)$$

7.3. Изгибающий (реактивный) момент M_p

$$\begin{aligned} M_p = & (Y_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} + Y_{\text{п.пл.}} \cdot G_{\text{п.пл.}} + Y_{\text{подв}} \cdot G_{\text{подв}} + Y_{\text{стр}} \cdot G_{\text{стр}} + Y_{\text{лест}} \cdot G_{\text{лест}} + Y_{\text{рук}} \cdot G_{\text{рук}} + Y_{\text{гр}} \cdot K_3 \cdot t) g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \\ & + (X_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} + X_{\text{п.пл.}} \cdot G_{\text{п.пл.}} + X_{\text{подв}} \cdot G_{\text{подв}} + X_{\text{стр}} \cdot G_{\text{стр}} + X_{\text{лест}} \cdot G_{\text{лест}} + X_{\text{рук}} \cdot G_{\text{рук}} + X_{\text{гр}} \cdot K_3 \cdot t) g \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta - \\ & - Y_p (P_{01} \cdot \cos(\omega t_i) + P_{02} \cdot \sin(\omega t_i)) - X_p (-P_{01} \cdot \sin(\omega t_i) + P_{02} \cdot \cos(\omega t_i)) + \\ & + Y_{\text{рук}} \cdot G_{\text{рук}} \cdot \ddot{X}_{\text{рук}} + Y_{\text{гр}} \cdot G_{\text{гр}} \cdot \ddot{X}_{\text{гр}} - X_{\text{рук}} \cdot G_{\text{рук}} \cdot \ddot{Y}_{\text{рук}} - X_{\text{гр}} \cdot G_{\text{гр}} \cdot \ddot{Y}_{\text{гр}} \end{aligned} \quad (12)$$

В третьей главе определены параметры нагружения и устойчивости платформы, а также выполнено моделирование нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации (при черпании и наклоне платформы).

Для расчета использованы массы узлов и координаты центров их масс, указанные в заводской документации. Для получения количественной оценки рассчитываемых величин использовался программный комплекс Mathcad.

В ходе расчетов получены значения координат перемещения центра масс платформы экскаватора ЭКГ-10 и узлов, расположенных на ней, за время черпания, а также определены координаты X_{Gi} точки пересечения линии действия силы тяжести G с роликовым кругом при различном наклоне экскаватора. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Результаты расчета и графики показывают, что положение центра масс платформы экскаватора относительно оси вращения зависит от траектории движения и степени наполнения ковша горной массой за время черпания.

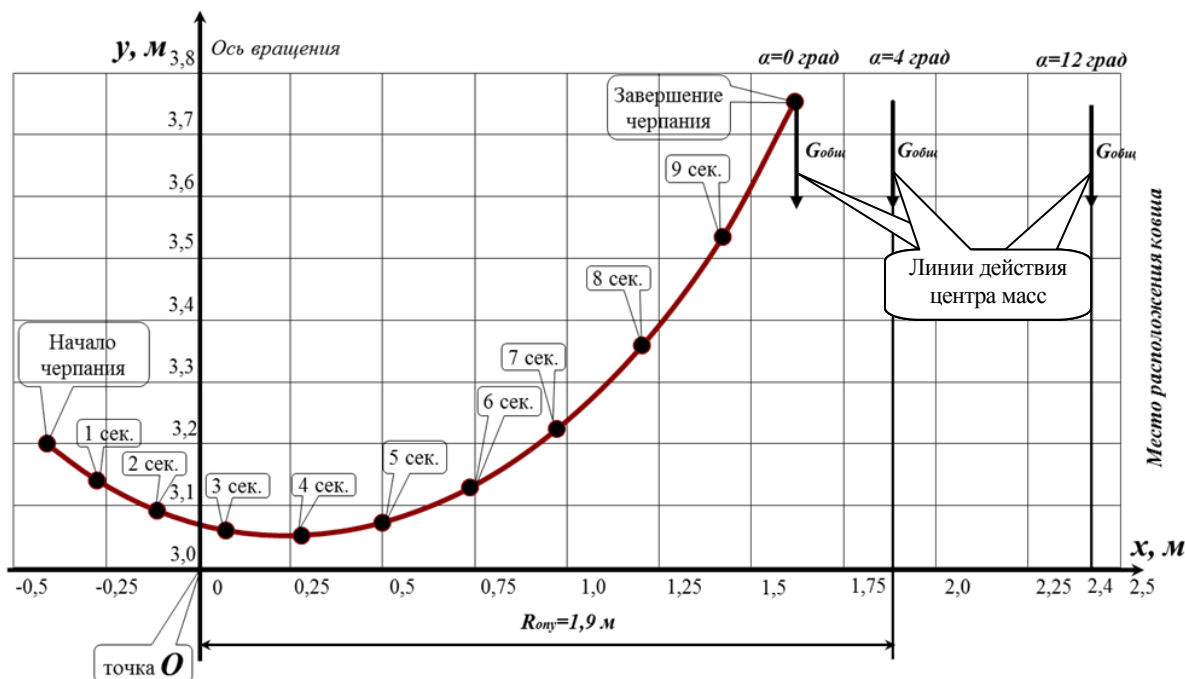


Рисунок 3 - Траектория центра масс механической системы платформы экскаватора ЭКГ-10 при различных углах ее наклона

Установлено, что при черпании горной массы и без наклона платформы экскаватора ЭКГ-10 центр масс перемещается от минус 0,41 до 1,66 м относительно ее оси вращения. При наклоне экскаватора координаты X_{Gi} точки пересечения линии действия силы G с роликовым кругом $R_{опу} = 1900$ мм изменяются от 0,27 до 2,41 м (при $\alpha_{общ} = 12$ град), что свидетельствует о потере устойчивости механической системы платформы, поэтому возникает опрокидывание относительно ребра, которым является передний ролик (точка B на рис. 1). Координата X_{Gi} располагается над передним роликом при наклоне экскаватора в продольном направлении в 4 градуса при завершении черпания и будет смещаться в сторону ковша при увеличении угла наклона поворотной платформы. Эти результаты позволили сформулировать первое научное положение.

В результате аналитических расчетов, выполненных в программе Mathcad, определены динамические и статические составляющие отрывающего усилия в центральной цапфе S , горизонтальной N_x и вертикальной N_y нагрузок, а также изгибающего момента M_p в ОПУ экскаватора ЭКГ-10. По результатам расчета построены обобщенные графики нагрузок и усилий, приведенные на рис. 4 и 5.

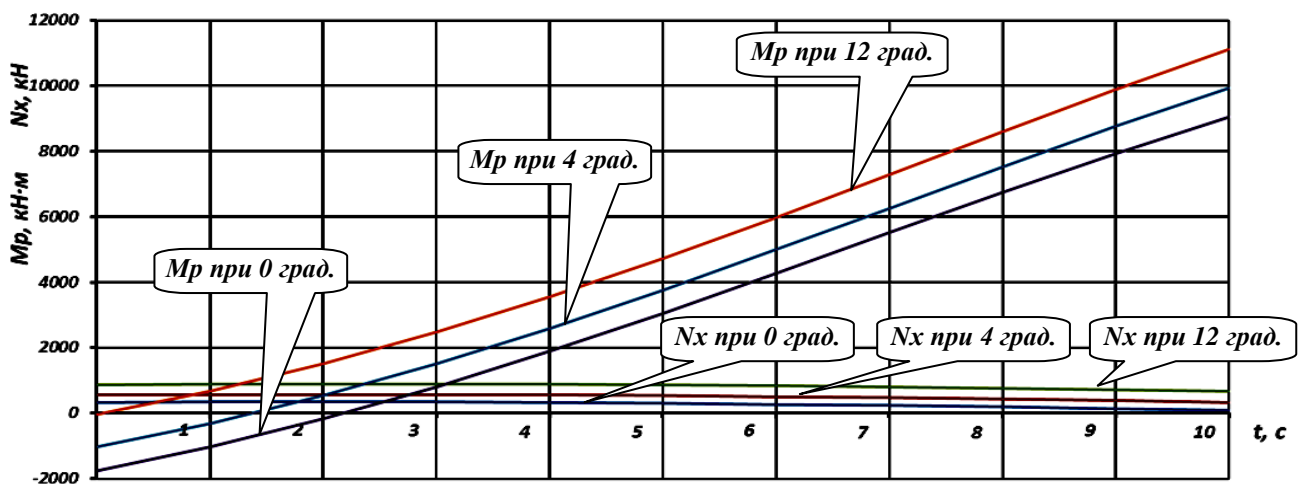


Рисунок 4 - Графики зависимостей горизонтальной N_x нагрузки и изгибающего момента M_p в ОПУ экскаватора ЭКГ-10 за время черпания при различных углах наклона платформы

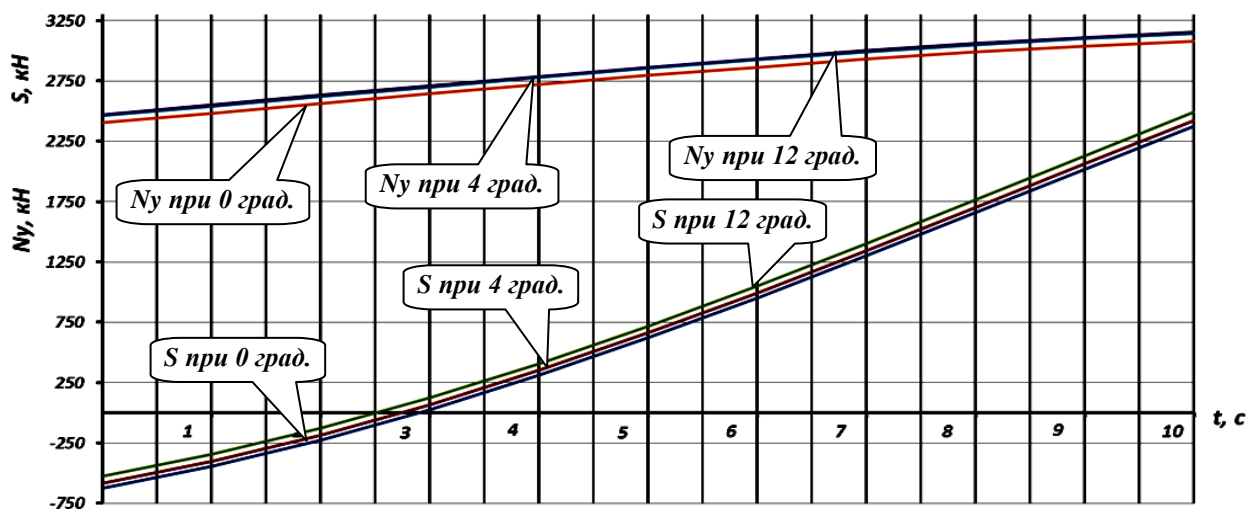


Рисунок 5 - Графики зависимостей отрывающего усилия S и вертикальной N_y нагрузки в ОПУ экскаватора ЭКГ-10 за время черпания при различных углах наклона платформы

Из анализа рис. 4 и 5 следует, что нагрузки и усилия в ОПУ зависят от времени черпания, усилий резания и напора, траектории движения центра масс платформы и угла ее наклона. Вертикальная нагрузка N_y изменяется от 2472 кН до 3082 кН, горизонтальная нагрузка N_x находится в диапазоне от 334,9 до 867,4 кН. Изгибающий момент M_p и отрывающая нагрузка S носят знакопеременный характер: от минус 1758,8 до 11122 кН·м для M_p и от минус 624 до 2494 кН для S .

В результате анализа аналитических расчетов установлено, что потеря устойчивости приводит к знакопеременному отрывающему усилию S в центральной цапфе, поэтому происходит перераспределение вертикальной нагрузки N_y (3082 кН) с роликов роликового круга на центральную цапфу (2494 кН), что позволило сформулировать второе научное положение.

Для оценки воздействия условий эксплуатации на параметры нагружения элементов ОПУ с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программе

SolidWorks Simulation построена модель напряженно-деформированного состояния (НДС).

В результате моделирования с приложением расчетных нагрузок установлено, что наиболее нагруженным элементом ОПУ является цапфа (рис. 6). Максимум напряжений расположен в области галтели, также концентратором напряжений является отверстие под рым-болт. В этом месте имеются напряжения, превышающие предел текучести для стали 40 ГОСТ 1050-88, из которой изготовлена цапфа (335 МПа). Этот факт подтверждает, что нагрузки, возникающие от усилий резани и напора, носят разрушающий характер и приводят к поломке цапфы.

Из анализа рис. 6 также следует, что на линии контакта пяти передних роликов и рельсов имеются максимальные напряжения, что подтверждает картину износа верхнего рельса при воздействии эксплуатационных нагрузок.

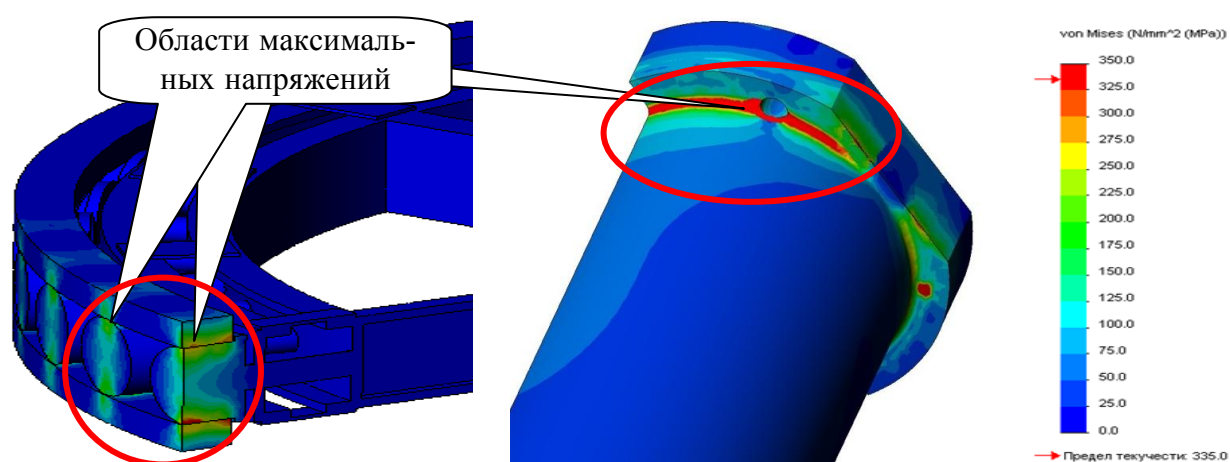


Рисунок 6 - Картина распределения эквивалентных напряжений по критерию Мизеса в элементах опорно-поворотного устройства экскаватора ЭКГ-10 при воздействии эксплуатационных нагрузок

Исходя из результатов анализа НДС с приложением максимальных нагрузок и усилий установлено, что возникает перераспределение напряжений в конструкции ОПУ: горизонтальная нагрузка и изгибающий момент воздействуют на центральную цапфу, вертикальная нагрузка воспринимается передней частью верхнего рельса.

Полученные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости, данных полученных в результате экспериментальных работ, аналитических расчетов и компьютерного моделирования НДС ОПУ экскаватора ЭКГ-10. Средняя погрешность не превышает 8 %.

В четвертой главе приведено обоснование и разработка технических решений по обеспечению допустимых параметров нагружения элементов опорно-поворотных устройств и обеспечения контроля устойчивости платформы.

Для снижения времени работы экскаватора с увеличенным углом наклона платформы, приводящим к смещению центра масс относительно оси вращения и потере устойчивости платформы, соответственно к износу отдельных элементов ОПУ, с использованием прибора КСЦ-1 разработано устройство контроля

угла наклона и блокирования механизма подъема ковша. Блок-схема работы нового устройства приведена на рис. 7.

Применение этого устройства обеспечивает рациональное перераспределение напряжений в узлах опорно-поворотного устройства за счет взаимодействия горизонтальной нагрузки и изгибающего момента на центральную цапфу, вертикальной нагрузки на верхний рельс, создавая тем самым условие устойчивости поворотной платформы. На основе этого сформулировано третье научное положение.

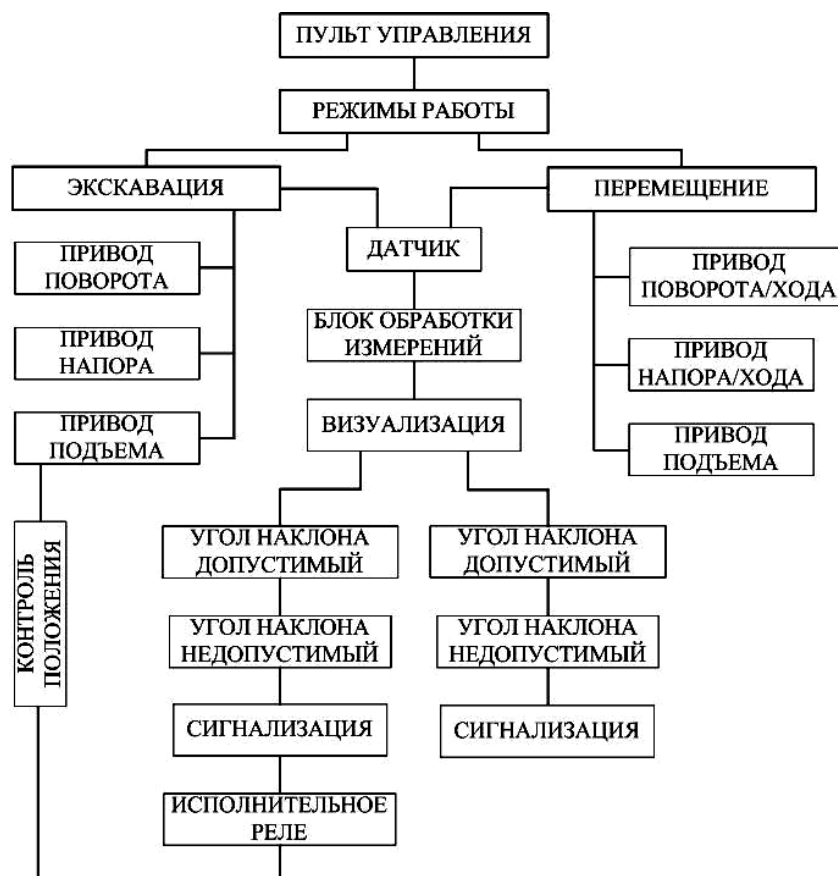


Рисунок - 7. Блок-схема работы устройства контроля угла наклона и блокирования механизма подъема ковша

Наличие разработанной модели нагружения опорно-поворотного устройства с приложением максимальных нагрузок, определенных впервые с учетом усилий резания и напора, перемещения центра масс и наклона поворотной платформы позволяет разрабатывать как различные конструкции отдельных элементов, так и компоновочные схемы опорно-поворотных устройств в целом.

Одним из решений для снижения концентрации напряжений центральной цапфы ОПУ, предложено изменить расстояние между диаметрально расположенными отверстиями под рым-болты относительно оси центральной цапфы с 460 до 230 мм с одновременным увеличением радиуса галтели с 10 до 25 мм. В результате повторного нагружения установлено, что конструкция исключает концентраторы напряжений, превышающих предел текучести материала. Это усовершенствование не влечет значительного изменения остальных (сопряженных) элементов опорно-поворотных устройств.

Разработанные технические решения по обеспечению допустимых параметров нагружения и контроля устойчивости платформы позволят снизить внеплановые простои экскаваторов по причине выхода из строя узлов опорно-поворотного устройства. Тем самым увеличится коэффициент технической готовности $K_{ТГ}$, который является одним из показателей функции надежности. Возможный экономический эффект от применения результатов настоящей работы можно выразить по отношению к стоимости часа работы экскаватора при увеличении коэффициента технической готовности $K_{ТГ}$. На примере работы одного экскаватора ЭКГ-10 филиала ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Бачатский угольный разрез» с наработкой в месяц 180 тыс. м³ экономический эффект может достигать до 1,52 млн. руб. в год (без учета затрат на механизацию ремонтных работ, стоимости запасных частей).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выполненного автором исследования дано новое решение актуальной научной задачи, состоящей в установлении связи условий эксплуатации с устойчивостью поворотных платформ и нагрузок в опорно-поворотных устройствах экскаваторов-мехлопат, а также в разработке технических решений, позволяющих повысить эффективность и безотказность использования экскаваторов-мехлопат на открытых горных работах России.

Научные и практические результаты выполненных исследований сводятся к следующему:

1. Выявлено влияние траектории движения центра масс поворотной платформы экскаватора-мехлопаты на величину статических и динамических нагрузок и усилий в опорно-поворотном устройстве при оценке параметров устойчивости платформы.

2. Установлено, что на положение центра массы поворотной платформы влияет характер движения ковша и рукояти в забое, а также степень наполнения ковша горной массой за время черпания. При этом координаты положения центра масс поворотной платформы находятся в диапазоне от минус 0,41 до 2,41 по оси абсцисс относительно оси вращения при различной величине с выходом за пределы опорной поверхности. Для сохранения устойчивости координата точки пересечения линии действия силы тяжести платформы с роликовым кругом должна находиться над передним роликом с предельным углом до 4 градусов без смещения в сторону ковша.

3. Получены аналитические зависимости нагрузок в опорно-поворотном устройстве и отрывающего усилия на центральной цапфе, с учетом времени черпания, усилий резания и напора, направления движения центра масс платформы, а также от угла ее наклона. Расчетом определено, что вертикальная нагрузка N_y изменяется от 2472 кН до 3082 кН, горизонтальная нагрузка N_x находится в диапазоне от 334,9 до 867,4 кН. Изгибающий момент M_p и отрывающая нагрузка S носят знакопеременный характер: от минус 1758,8 до 11122 кН·м для M_p и от минус 624 до 2494 кН для S . При потере устойчивости платформы и воздействии нагрузок происходит перераспределение вертикальной нагрузки ($N_y=3082$ кН) с роликов роликового круга на цапфу ($S=2494$ кН).

4. Анализ напряженно-деформированного состояния опорно-поворотного устройства позволил установить картину перераспределения напряжений в его элементах, что в процессе эксплуатации приводит к изменению технического состояния, вплоть до износа и излома отдельных элементов. Использование разработанной модели напряженно-деформированного состояния позволит разрабатывать как различные конструкции отдельных элементов, так и компоновочные схемы опорно-поворотных устройств при воздействии максимальных нагрузок и потере устойчивости платформы, необходимых для снижения концентрации напряжений. Одним из таких решений предложена усовершенствованная цапфа, рациональная конструкция которой снижает концентрацию напряжений при воздействии эксплуатационных нагрузок.

5. Обоснована область применения предложенного устройства контроля угла наклона и блокирования механизма подъема ковша в условиях эксплуатации, приводящих к перераспределению нагрузок и усилий в опорно-поворотном устройстве в режиме потери устойчивости. Взаимодействие горизонтальной нагрузки и изгибающего момента на центральную цапфу и вертикальной нагрузки на верхний рельс обеспечивает условие устойчивости поворотной платформы. Экономическая эффективность от реализации технических решений может составить порядка 1,52 млн. рублей в год, за счет снижения внеплановых простоев оборудования, а также прямых и косвенных затрат на восстановление работоспособности.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

– исследовать характер износа элементов опорно-поворотного устройства исходя из трибологических особенностей контактного взаимодействия сопряженных элементов, что необходимо для снижения влияния внешних факторов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК России:

1. Буянкин, П. В. Оценка влияния уклона рабочей площадки экскаваторов типа «прямая мехлопата» на нагрузки и отказы центральной цапфы опорно-поворотных устройств / П. В. Буянкин // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 10–14.

2. Хорешок, А. А. Исследование причин наклона поворотной платформы экскаватора-мехлопаты и оценка их воздействия на нагрузки опорно-поворотного устройства / А. А. Хорешок, П. В. Буянкин, Е. К. Соколова // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №3. – С. 11-14.

3. Буянкин, П. В. Расчет нагрузок в опорно-поворотном устройстве экскаватора-мехлопаты / П. В. Буянкин // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2014, №2. – С. 19–21.

4. Хорешок, А. А. Оценка эксплуатационных нагрузок на опорно-поворотное устройство экскаваторов-мехлопат /А. А. Хорешок, И.Д. Богомолов, П. В. Буянкин, А. В. Воробьев // Горное оборудование и электромеханика. – 2014. – №6. – С. 43-46.

Статьи, опубликованные по результатам российских и международных конференций:

5. Богомолов, И. Д. Состояние оборудования экскаваторного парка Кузбасса и средства повышения его безопасной эксплуатации / И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин // Безопасность жизнедеятельности предприятий в угольных регионах: Материалы VI Межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2005. – С. 93–96.

6. Богомолов, И. Д. Состояние рабочего оборудования экскаваторного парка Кузбасса / И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин // Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета по результатам юбилейной 50-й научно-практической конференции, ГУ КузГТУ, 18–23 апр. 2005. – Кемерово, 2005. – С. 79–81.

7. Менчугин, А. В. Применение методов неразрушающего контроля при проведении технического диагностирования металлоконструкций одноковшовых шагающих экскаваторов / А. В. Менчугин, И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин // Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета по результатам 51-й студенческой научно-практической конференции, ГУ КузГТУ, 17–21 апр. 2006 / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2006. – с. 77–80.

8. Менчугин, А. В. Испытание несущих элементов металлоконструкций одноковшовых экскаваторов с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии / А. В. Менчугин, П. В. Буянкин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды VIII межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2006. – С.110-114.

9. Менчугин, А. В. Основные проблемы эксплуатации металлоконструкций горно-транспортного оборудования на угольных разрезах Кузбасса / А. В. Менчугин, П. В. Буянкин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды IX межд. науч. – практ. конф. – Кемерово, 2007. – С.137-140.

10. Богомолов, И. Д. Оценка влияния условий эксплуатации на долговечность опорно-поворотных устройств экскаваторов типа ЭКГ на угольных разрезах Кузбасса / И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин, А. В. Буянкин // Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета по результатам 53-й студенческой научно-практической конференции, ГУ КузГТУ, 14–18 апр. 2008 / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2008. – с. 73–75.

11. Богомолов, И. Д. Проблемы эксплуатации металлоконструкций опорно-поворотных устройств экскаваторов типа ЭКГ при работе на угольных разрезах Кузбасса / И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири: Материалы XII Межд. науч.-практ. конф. «Сибресурс–2008». – Кемерово, 2008. – С. 146–148.

12. Богомолов, И. Д. Эксплуатация металлоконструкций опорно-поворотных устройств экскаваторов типа ЭКГ на угольных разрезах Кузбасса / И. Д. Богомолов, П. В. Буянкин, А. В. Менчугин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды X межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2008. – С.79-83.

13. Буянкин, П. В. Оценка нагрузок и отказов узла центральной цапфы экскаваторов типа ЭКГ при работе на рабочих площадках с уклоном / П.В. Буянкин, И. Д. Богомолов // Сборник лучших докладов студентов и аспирантов Кузбасского государственного технического университета по результатам 54-й студенческой научно-практической конференции, ГУ КузГТУ, 20–24 апр. 2009 / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2009. – Т.1. – С. 73–75.

14. Буянкин, П. В. Исследование условий нагружения элементов опорно-поворотных устройств экскаваторов типа «прямая мехлопата» / П. В. Буянкин // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды XI межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2009. – С.169-172.

15. Протасов, С. И. Результаты приемочных испытаний экскаватора WK-35, производства Тайюаньского завода тяжелого машиностроения (КНР) / С. И. Протасов, П. В. Буянкин, С. А. Герасименко // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды XIV межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2012. – С.142-144.

16. Буянкин, П. В. Моделирование динамических нагрузок на опорно-поворотное устройство экскаватора-мехлопаты / П. В. Буянкин, Е. К. Соколова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: Труды XV межд. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2013. – С.38-41.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[2, 5-9, 12, 15] – постановка задач и проведение исследований, обработка результатов;

[10, 11, 13] – разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов.

[2, 4, 16] – разработка моделей, проведение вычислительных экспериментов, общий анализ;

Подписано в печать ____ . ____ .2015 г.

Усл. печ. л. 1,00. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж 90 экз. Заказ ____.

КузГТУ. 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Отпечатано в издательском центре УИП КузГТУ.

650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А