

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

До Дык Чонг



ОЦЕНКА НАГРУЖЕННОСТИ ОСНОВНЫХ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ ЭКГ-10,
РАБОТАЮЩИХ НА УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗАХ ВЬЕТНАМА

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Насонов М.Ю.

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ	10
1.1 Сравнение условий угольных разрезов Вьетнама и Кузбасса РФ	10
1.2 Трещинообразование в металлоконструкциях экскаваторов при разработке горных пород	17
1.3 Оценка надежности работы металлоконструкций	21
1.4 Постановка цели и задач исследования	26
1.5 Выводы по главе 1	27
ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ	28
2.1 Экспериментальное определение напряжений в исследуемых объектах тензометрическим способом.....	28
2.2 Методика определения параметров развала при подготовке к экскавации.....	41
2.3. Способы обнаружения трещиноподобных дефектов.....	42
2.4 Выводы по главе 2	49
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ.....	50
3.1 Причины образования трещин в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10	50
3.2. Влияние параметров развала горных пород на уровень напряженное состояние металлоконструкций экскаваторов	53
3.3 Выводы по главе 3	67
ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ	68
4.1 Конечно-элементное моделирование металлоконструкций экскаваторов	68
4.2 Шнековый исполнительный орган с внутренним двигателем для ковша карьерного экскаватора	72
4.3 Расчет металлоконструкций экскаватора на долговечность	77
4.4 Выводы по главе 4	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения (Институт Энергетического и Горного Машиностроения – Винакомин).....	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения (Промышленного университета Куангниня).....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на изобретение	104

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Рост экономики Вьетнама во многом зависит от добычи угля, который используется для выработки электроэнергии на электростанциях, в металлургической промышленности и для отопления помещений в зимний период. Рост угольной отрасли Вьетнама зависит от развития открытого способа добычи угля и других полезных ископаемых. В этом направлении огромную роль играют экскаваторы, работающие на перевалке взорванных и невзорванных скальных пород и погрузке угля. На разрезах Вьетнама работает значительное количество экскаваторов ЭКГ-10 и других марок, однако большая часть этих экскаваторов имеет большой срок службы, и поэтому большая доля их должна быть снята с эксплуатации, несмотря на это они продолжают работать. Горная промышленность занимает особое положение среди других отраслей экономики как наиболее фондоемкая отрасль промышленности.

Эффективность производства зависит от эффективности использования основных фондов, активную часть которых составляет горное оборудование, в том числе и экскаваторы. На содержание оборудования расходуется до 30% всех затрат, определяющих себестоимость продукции при добыче угля, прибыль и конкурентоспособность горного предприятия. Рассматривая работу карьерных экскаваторов необходимо отметить их высокую фондовооруженность, материалоемкость, энергоемкость, металлоемкость и высокую стоимость. Это дает высокую производительность и эффективность. Поэтому их незначительные простои значительно снижают прибыль предприятия и в отдельных случаях дают убытки.

Основная задача службы главного механика – это сокращение простоев, которые возникают в результате отказов различного оборудования экскаваторов. Стратегия технического обслуживания экскаваторов возможна по двум направлениям: первое – техническое перевооружение, т.е. замена экскаваторов, выработавших свой срок службы на новые; второе – организация правильного обслуживания и ремонта.

Исследования причин выхода из строя экскаваторов установили, что наибольшая часть до 70% это выход из строя механического оборудования, на втором месте стоит выход из строя металлоконструкций до 30% поломок. Причиной выхода из строя металлоконструкций является образование трещин в основном металле и сварных швах. Уменьшение числа аварийных ситуаций вызванных образованием трещин в металлоконструкциях возможно за счет создания модели воздействия горных пород на элементы экскаватора при их экскавации.

В связи с этим разработка алгоритма оценки технического состояния несущих конструкций экскаваторов, для исключения их разрушения, и увеличения их безаварийного срока работы путем постановки на ремонт может считаться своевременным и актуальным. Уровень надежности и работоспособности эксплуатации электрических карьерных экскаваторов (ЭКГ) на горных предприятиях Вьетнама должен быть таким, чтобы снижалась доля отказов основных металлоконструкций, приводящих к сложному и продолжительному ремонту.

Низкий уровень надежности вызывает снижение работоспособности, что вызывает прекращение функционирования сложной технической системы в результате отказа по причинам разрушения металлоконструкций. Весьма важным для угольных карьеров является наличие высокой готовности экскаваторов, за счет уменьшения аварийных ситуаций, снижения продолжительности ремонтов, что повысит эффективность их применения.

Степень разработанности темы исследования

В диссертационной работе рассматривается два вопроса – это определение механических нагрузок, возникающих в конструкциях экскаваторов при экскавации горных пород, и оценка технического состояния этих металлоконструкций при наличии развивающихся трещин.

Большая исследовательская работа об исследовании нагрузок на металлоконструкции экскаваторов при разработке пород I-III категории (классификация Ю.И. Белякова) проведена в работах К.Е. Веницкого, Д.П.

Волкова, Н.Г. Домбровского, Н.В. Мельникова, А.Н. Зеленина Л.И. Кантовича, В.Р. Кубачека, С.А. Панкратова, Р.Ю. Подэрни, Б.И. Сатовского установлены уровни нагрузок для различных экскаваторов. Влияние взорванных пород на напряжения, возникающие в металлоконструкциях экскаваторов, исследованы в работах И.А. Паначева, К.В. Антонова, А.Н. Путятин, А.А. Черезова. В области исследований функционирования конструкций в условиях развития трещин большую роль сыграли работы Д. Броека, В.В. Болотина, Г.М. Волохова, С.Н. Журкова, В.П. Когаева, К.Д. Махутова, В.В. Москвичева, А.Н. Романова, В.Т. Трощенко, Д.А. Трощенко, С.В. Серенсена, Н.А. Хапонена, Г.П. Черепанова, А.А. Шаталова.

Исследования показывают, что надежность горных машин требует своего повышения, и она определяется горнотехническими, организационными, климатическими и эксплуатационными причинами. Отказ одного из критических элементов металлоконструкции экскаватора способен привести к остановке всего производственного процесса. В научных работах, связанных изучением надежности карьерных экскаваторов, не полностью исследованы направления по ее повышению с использованием статистических данных, выделяющих отдельные металлоконструкции отказы которых могут нанести значительный урон. Определение их предотказного состояния позволило бы выполнять ремонт исключая отказы и продлевая сроки нормальной эксплуатации. В связи с чем проведение исследований в области надежности, является актуальным.

Объект исследования – металлические конструкции экскаваторов ЭКГ-10 в процессе разработки горных пород

Предмет исследования – развитие трещин в металлических конструкциях экскаваторов – типа прямая лопата при разработке горных пород.

Цель работы

Повышение надежности карьерных экскаваторов на горных предприятиях Вьетнама посредством проведения предупреждающих ремонтов их металлоконструкций, что уменьшает время приведения экскаваторов в

нормальное состояние, создает необходимый уровень технической готовности и сокращает эксплуатационные расходы.

Идея работы заключается в продлении периода эксплуатации сложной технической системы путем проведения предупреждающих текущих ремонтов элементов металлоконструкций экскаватора, наиболее подверженных выходу из строя, обеспечивающих необходимый уровень надежности, дающих возможность увеличивать период работы до необходимого уровня.

Основные задачи исследования:

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеследующих задач:

1. Оценить экскаватор, как сложную техническую систему и выявить наиболее критические элементы металлоконструкций, влияющие на число отказов работы машины;
2. Оценить нагруженность выявленных критических элементов металлоконструкций экскаваторов.
3. Провести экспериментальные исследования и имитационное моделирование критических металлоконструкций экскаваторов при помощи конечно-элементного способа;
4. Разработать практические мероприятия по продлению срока безопасной эксплуатации и своевременной постановке экскаваторов на ремонт.

Научная новизна работы

1. Найдены зависимости между взрывной подготовкой горных пород и скоростью роста трещин в основных металлоконструкциях экскаваторов ЭКГ-10;
2. Установлены закономерности изменений нагруженности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при разработке невзорванных пород;
3. Созданы алгоритмы оценки долговечности металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при разработке взорванных и невзорванных горных пород.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты исследования позволяют:

1. Оценивать долговечность металлоконструкций экскаваторов в условиях развивающихся трещин при разработке горных пород;
2. Увеличивать продолжительность работы элементов конструкций ЭКГ-10, исключать аварии при разработке горных пород;
3. Указывать продолжительность безаварийной эксплуатации металлоконструкций экскаваторов и необходимое время ремонтов.

Результаты работы могут быть использованы в процессе реализации научных проектов для оценки долговечности металлоконструкций экскаваторов в условиях развивающихся трещин при разработке горных пород, увеличения продолжительности работы элементов конструкций ЭКГ-10, исключения аварий при разработке горных пород в «Институте Энергетического и Горного Машиностроения – Винакомин», Вьетнам (акт о внедрении от 28.03.2022, приложение А).

Результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе в университетах Вьетнама (акт внедрения результатов в Промышленном университете Куангниня, Вьетнам от 10.02.2022, приложение Б).

Методология и методы исследований

Исследования выполнялись на основе изучения литературных источников; аналитических, лабораторных и натурных работ с обработкой результатов математической статистикой; моделирование работы металлоконструкций экскаваторов с использованием строительной механики, теории упругости; синтезирование теоретических и экспериментальных исследований в общую концепцию.

На защиту выносятся следующие положения:

1. На основе статистического анализа выявлены наиболее опасные элементы металлоконструкций экскаватора как сложной технической системы, которыми являются стрела экскаватора и двуногая стойка, на них приходится 35% и 15% отказов работы.
2. Используя комплексность теоретического и экспериментального исследований получены зависимости скорости роста усталостных трещин в

зависимости от среднего диаметра куска и коэффициента разрыхления пород; установлено, что увеличение среднего диаметра куска в развале при его разработке экскаватором с 0,2 до 0,5 м приводит к увеличению скорости роста усталостных трещин в металлоконструкциях экскаваторов ЭКГ-10 в 1,5 раза, а снижение коэффициента разрыхления с 1,5 до 1,1 в 1,35 раза, при этом снижается в среднем в 1,33 раза число циклов нагружения до достижения трещинами их критических длин.

Степень достоверности результатов работы исследования

Научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается: теоретическими исследованиями, связанными с фундаментальными положениями, теории упругости, строительной механики, механики разрушения, математического анализа; достаточным объемом экспериментальных исследований, полученных в лабораторных и натурных условиях; применением проверенных компьютерных программ.

Апробация результатов.

Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. VI Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME – 2019». Санкт-Петербург, Россия, 2019.
2. Международная научно-практическая конференция «Научно-практические исследования», Москва, Россия, 2020.
3. VIII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME – 2021». Санкт-Петербург, Россия, 2021.
4. XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, Санкт-Петербург, Россия, 2021.

Личный вклад автора заключается в исследовании влияния свойств развала взорванных горных пород и невзорванных пород в массиве на рост

трещин в несущих конструкциях экскаваторов; в создании расчетных моделей роста трещин в элементах металлоконструкций экскаваторов с учетом условий работы, в создании алгоритмов оценки тех. состояния и долговечности металлоконструкций экскаваторов при наличии сварочных дефектов и продления сроков их безаварийной эксплуатации.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 1 статье - в издании, входящем в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент, приложение В.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, 3 приложений. Диссертация изложена на 104 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 4 таблиц.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Сравнение условий угольных разрезов Вьетнама и Кузбасса РФ

Вьетнам имеет большое разнообразие сырьевых ресурсов: нефти, газа, руд железа, марганца, хрома, олова, меди, свинца, цинка, бокситов и т.д. Среди них значительное место занимает уголь (разведанные запасы более двухсот миллиардов тонн). Уголь является главным поставщиком тепловой энергии в основные отрасли промышленности, в жилые и общественные здания.

На территории Вьетнама рассредоточено большое число угольных месторождений, основными из которых являются три месторождения, которые располагаются в северо-восточных районах страны (рисунок 1.1).

На этих разрезах в основном добывают бурый уголь – 95% и в меньшей степени каменный – 5%.



Рисунок 1.1 – Угольные бассейны северного Вьетнама:

1 – Куангнинь; 2 – Шонгхонг; 3 – Нойдиа

Наиболее известные бассейны – это Куангнинь, на котором добывается каменный уголь – мощность более 10 млрд. т; Шонгхонг – добывается бурый угольный – мощность более 60 млн. т. [90, 101].

Развитие Вьетнама требует увеличение добычи угля: наиболее значительный рост потребления предполагается в теплоэнергетике, с 2020 года по 2025 планируется увеличение с 170 до 310 млн. т., а в целом по всем отраслям с 195 до 340 млн. т.

В угольной отрасли Вьетнама, важную роль играют открытый способ добычи; около 50 % угля добывается на разрезах: Кокшау, Нуйбео, Хату, Каошон, Деонай, и Дамай, которые принадлежат угольному бассейну Куангнинь; разрезы Назыонг, Ханьхоа – относятся к бассейну Нойдиа.

Годовой объем добычи угля на этих разрезах достигает 20 млн. т; объем вскрыши достигает 190 млн. м³.

Вскрышные породы – представлены по большей части алевролитами и известниками, на втором месте – песчаниками, на третьем месте – конгломератами:

- Алевролиты и известняки – 38÷42 %;
- Песчаники – 32÷38 %;
- Конгломераты составляют 20÷30 %.

Особенности климата: постоянная влажность, практически стабильные температуры, значительный объем осадков – до 2000 мм/год – это вызывает сильную обводнённость слоев породы.

На летний период приходится до 90 % дождей, которые могут продолжаться длительное время, с большим объемом осадков, температуры при этом меняются в границах 25-30°C.

На зимний период приходится 10% дождей, с малым объемом осадков, температуры при этом меняются в границах 15-25°C.

Большой объем атмосферных осадков создает водоносные слои, которые в отдельных местах достигают 300 м и они лежат над угольными пластами, что ухудшает работу экскаваторов.

Вскрышные породы на разрезах Вьетнама имеют следующие физико-технические свойства:

1. Плотность пород: $2,4 \div 2,7$ т/м³;
2. Предел прочности на одноосное сжатие: $70 \div 137$ МПа;
3. Предел прочности на одноосное растяжение: $8 \div 21$ МПа;
4. Угол внутреннего трения: $20 \div 35^\circ$;
5. Сцепление: $23 \div 34$ МПа.
6. Трещиноватость массивов – размер блока: $0,3 \div 1,5$ м.

Породы разрезов Кузбасса исследованы достаточно полно [56, 79].

Прочностные свойства пород на разрезах Вьетнама и Кузбасса имеют значительную схожесть (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Прочностные свойства пород на разрезах Вьетнама и Кузбасса.

Пределы прочности, МПа	Районы расположения разрезов	
	Вьетнам	Кузбасс
Конгломерат		
Сжатие	$70 \div 137$	—
Растяжение	$12 \div 18$	—
Песчаники		
Сжатие	$90 \div 120$	$60 \div 90$
Растяжение	$11 \div 32$	—
Алевриты и известняки		
Сжатие	$44 \div 117$	55
Растяжение	$8 \div 21$	—

Поэтому экскаваторы, работающие на разрезах, обоих бассейнов получают схожие повреждения при экскавации горных пород.

На разрезах Вьетнама широко распространены следующие экскаваторы ЭКГ-5А, ЭКГ-8И, ЭКГ-10 (рисунок 1.2).

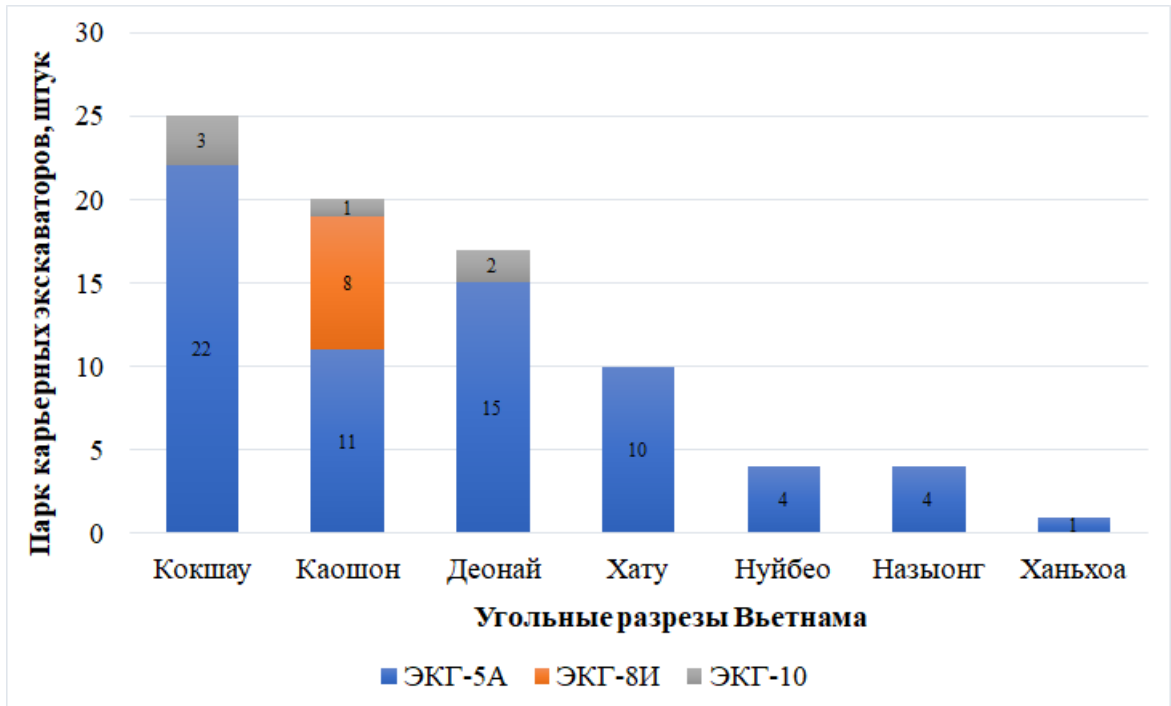


Рисунок 1.2 – Парк карьерных экскаваторов на угольных разрезах Вьетнама

Запасы угля в Кузбассе составляют 725 млрд. т, запасы, лежащие близко к поверхности – более 15 млрд. т [84]. Причем условия разработки пластов, весьма различны, включая и физико-механические свойства вскрышных пород [56, 60].

Толщины угольных пластов весьма значительны: от 1 м до 3 м и более. В мощных пластах сосредоточено большая часть угля, который может разрабатываться открытым способом [84].

Наиболее часто встречаются песчаники, аргиллиты являются промежуточным слоем среди алевролитов.

Объединяющий породы цемент в основном глинистый, кремнистый иногда карбонатный песчаник.

Разработаны модели для оценки прочностных свойств пород [82] на основе предела прочности при сжатии и диаметре средней блочности (1.1 и 1.2)

$$\sigma_{сж} = a_1 \cdot \exp(-b_1 \cdot p) \quad (1.1)$$

$$d_c = c - \kappa \cdot p, \quad (1.2)$$

где p – ранг генетических признаков;

a_1, b_1, c, κ – коэффициенты, зависящие от материалов [85].

Один из важных параметров – это коэффициент крепости пород по шкале проф. Протодяклова М.М, который связан с прочностными параметрами куска породы взятого из массива, но в массиве существуют трещины, которые значительно снижают прочность массива.

При экскавации пород трещиноватость играет большую роль, она может, как снижать, так и увеличивать нагрузки на металлоконструкции экскаватора. Трещиноватость связана с блочностью пород в массиве, чем выше блочность, тем труднее эти породы экскавировать.

По трудности экскавации породы делятся на 3 категории и их соотносят с блочностью пород и их взрываемостью. По классификации НИИОГР в общем легковзрываемые составляют – 40%, средней взрываемости – 40% и трудновзрываемые – 20%.

Горные породы Кузбасса достаточно исследованы [36, 40-43, 73, 79, 103, 106, 109, 121]. Проведенные испытания горных пород с целью получения их физико-механических свойств показали значительное сходство с породами Вьетнама [88] (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Свойства пород Кузбасского бассейна.

Тип породы	Плотность, кг/м ³	$\sigma_{в}$, МПа,	E , МПа,	μ
Мелкоблочные	2520	56,2	$1,95 \cdot 10^5$	0,25
Среднеблочные	2490	62,7	$1,68 \cdot 10^5$	0,29
Крупноблочные	2550	91,7	$2,76 \cdot 10^5$	0,33

Мелкоблочные породы – алевалиты, среднеблочные и крупноблочные – песчаники.

Естественные отдельности массива горных пород позволили создать несколько классификаций [7, 9, 19, 21, 24, 59, 82-86, 94, 95].

Одна из классификаций связана с размером куска породы в развале при сравнении его с шириной ковша экскаватора (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Классификация взорванной горной массы в соответствии с размерами кусков породы.

Кусковатость	Соотношение между размером куска породы и шириной ковша
Очень мелкая	$< 0,05$
Мелкая	$0,05 \div 0,1$
Средняя	$0,1 \div 0,2$
Крупная	$0,2 \div 0,3$
Очень крупная	$> 0,3$

Породы Кузбасского угольного бассейна имеют полимодальное распределение по блочности (рисунок 1.3, таблица 1.4) [84].

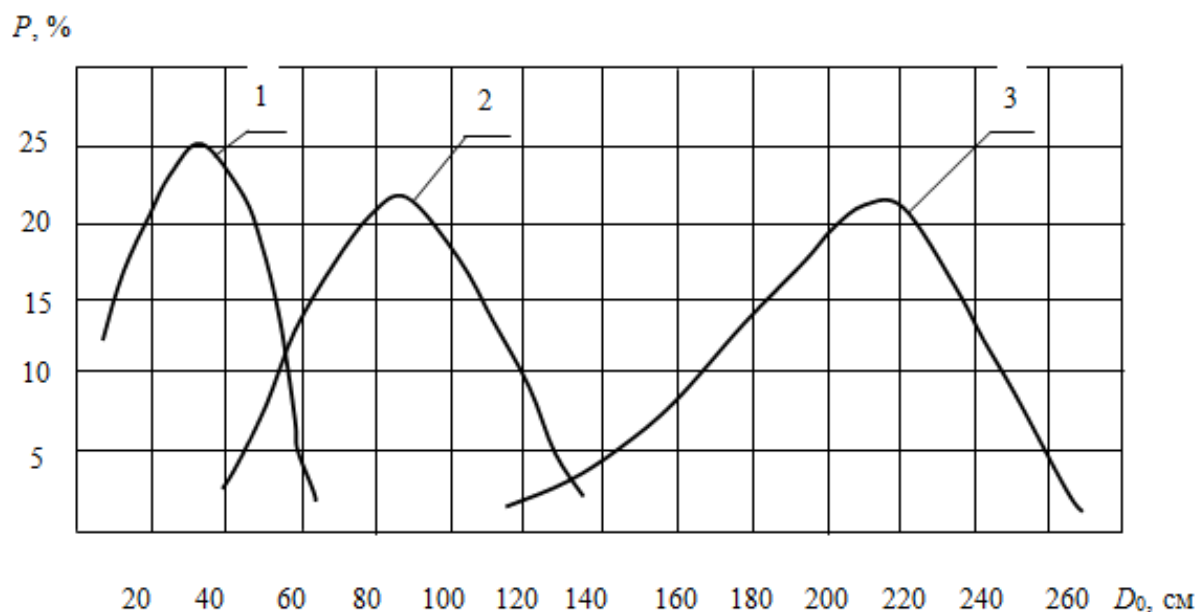


Рисунок 1.3 – Распределение по блочности пород Кузбасского угольного бассейна:

1 – мелkobлочные; 2 – средней блочности; 3 – крупноблочные

Таблица 1.4 – Структура пород Кузбасского угольного бассейна [86].

Блочность породы	Размер блока, м	Плотность, кг/см ³	σ_b , МПа
<u>Мелкоблочные</u> Алевриты и алевритовые песчаники.	0,312	2,4÷2,58	30÷60
<u>Средней блочности</u> Песчаники крупнозернистые.	0,83	2,48÷2,52	60÷80
<u>Крупноблочные</u> Песчаники средне- и мелкозернистые.	2,04	2,5÷2,6	80÷100

Размеры блоков пород в невзорванном массиве меняются от 0,31 до 2,04 м [85].

Блочная структура массивов пород может быть отнесена к единообразной системе [20, 99].

Средний диаметр блоков в массиве подразделяет породы на три типа: 0,31 м – мелкоблочные; 0,83 м – среднеблочные; 2,04 м – крупноблочные [99].

Увеличение блочности приводит к увеличению предела прочности пород при сжатии: среднеблочные породы имеют σ_b в границах от 60 до 80 МПа, крупноблочные от 80 до 100 МПа [84].

Среднеблочные и крупноблочные породы, имея высокую прочность, при взрывной подготовке дают большой выход негаборита и некондиционных кусков. Это вызывает возникновение больших амплитуд напряжений в металлоконструкциях и создает условия для возникновения и развития трещин, что в свою очередь вызывает поломки и непредвиденные ремонты.

В результате сравнения условий карьеров Северного Вьетнама и Кузбасса РФ можно обнаружить значительную схожесть. Отличие заключается в том, что некоторые породы в невзорванном состоянии имеют во Вьетнаме большую прочность при сжатии. Однако на их экскавацию это не влияет.

1.2 Трещинообразование в металлоконструкциях экскаваторов при разработке горных пород

Аварии экскаваторов по причине трещинообразования в металлоконструкциях приводят к простоям, которые связаны с длительностью и большой стоимостью ремонтно-восстановительных работ.

Потеря прочности приводит к одному из видов разрушения объекта – частичному или полному [46, 87, 99, 100].

При частичном (пластическом) разрушении происходит достижение напряжениями предела текучести и появления значительных пластических деформаций.

При полном разрушении происходит достижение напряжениями предела прочности и разделение объекта на две или несколько частей.

Полное разрушение может быть как пластическим, если материал пластичный, то происходит медленное разделение элемента конструкции, так и хрупким, если материал хрупкий, то происходит мгновенное разрушение.

Кроме двух перечисленных видов разрушения существует третье – это усталостное разрушение, оно возникает при циклическом нагружении, от которого имеющиеся дефекты преобразуются в трещины. Их рост приводит к критическим ситуациям и разрушению объекта. Подрастание трещины не является процессом одномоментным, рост трещины до полного разрушения, может занимать до 90 % времени работы конструкции [9, 10], так как происходит процесс накопления дефектов [47-49, 65].

Поэтому присутствие трещины в объекте не требует ее мгновенного устранения, необходимо знать длительность ее развития до критического размера с целью предотвращения аварии посредством текущего ремонта.

Наблюдения показали существование многочисленных трещин при разработке взорванных и невзорванных горных пород, в среднем было зарегистрировано 1,3 случая в год. Характерные места разрушений показаны на рисунках 1.4-1.6 [65].



Рисунок 1.4 – Трещины в подвеске ковша экскаватора ЭКГ-10



Рисунок 1.5 – Трещина в ходовом механизме экскаватора ЭКГ-10



Рисунок 1.6 – Трещины в поворотной платформе экскаватора ЭКГ-10

Обследования карьерных экскаваторов выявили места наиболее частого образования трещин [65] (рисунок 1.7).

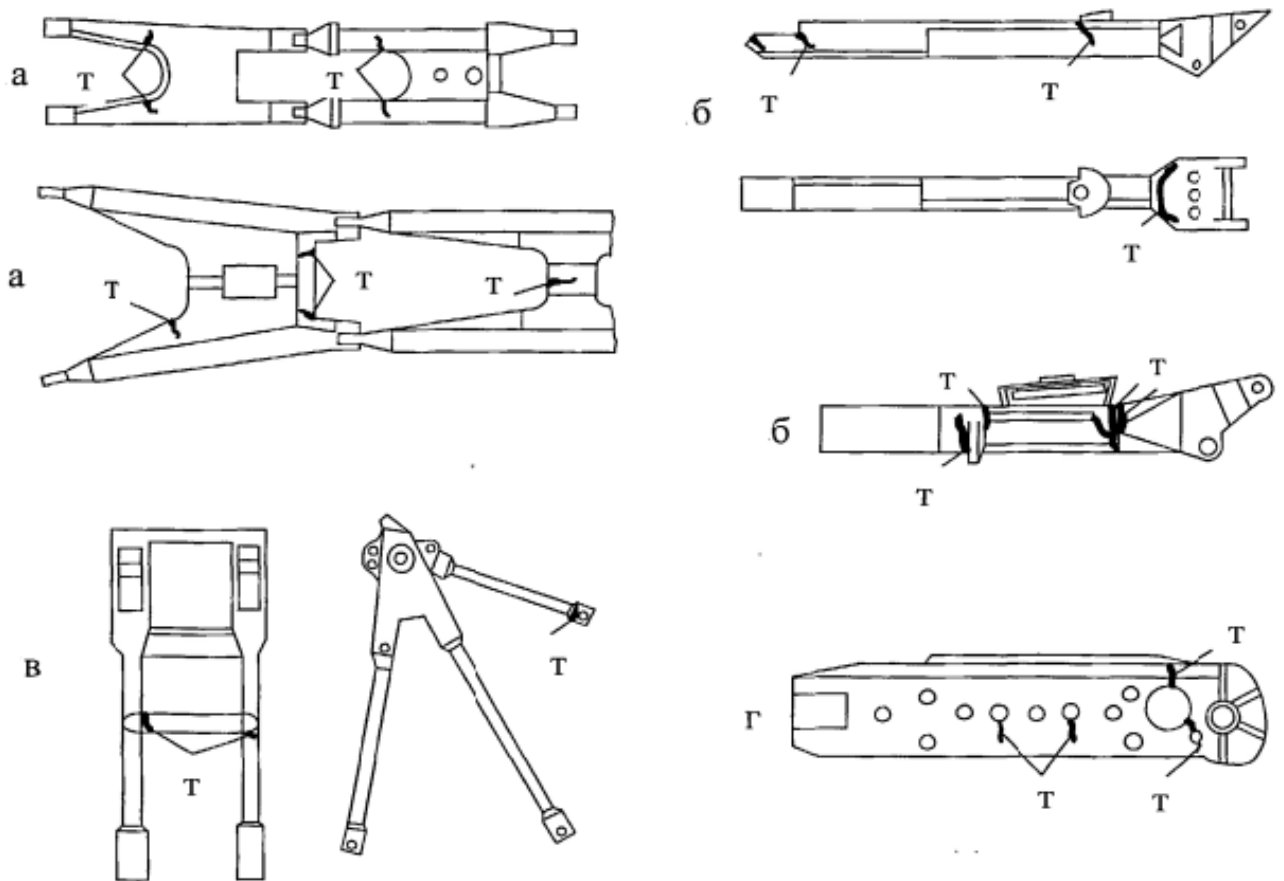


Рисунок 1.7 – Места образования трещин в металлоконструкциях карьерных экскаваторов:

а – стрела; б – рукоять; в – двуногая стойка; г – гусеничная тележка;

Т – трещины

Основными зонами образования трещин экскаваторов типа ЭКГ являются:

1. Верхняя секция стрелы [65] (рисунок 1.7, а) –
- места присоединения листов к несущим трубам;
2. Нижняя секция стрелы [65] (рисунок 1.7, а) –
- сварная коробка;
3. Балки рукоятей: (рисунок 1.7, б) [65];
- в зонах заглушек;
- приливы балок;

Зона соединения обоймы блока к рукояти и зоне соединения концевой отливки с трубой рукояти (см. рисунок 1.7, б) [65];

4. Двуногая стойка:
- разрушение передних стоек [65, 80, 81];

- проушины подкосов;

5. Рама:

- отверстия (рисунок 1.7, г);
- места истирания рамы;
- балансира;
- галтели.

Причинами образования трещин в металлоконструкциях экскаваторов и их отказов являются [64-66]:

- циклическое нагружение и ее высокий уровень (поток отказов при переходе на экскавацию грунтов с III на V категорию увеличивается в два раза [30-35, 65]);

- сварочные дефекты;
- концентрация напряжений;
- резкие изменения сечения узлов;
- технологические отверстия;
- механические повреждения металлоконструкций;
- наличие групп трещин, дислоцированных вблизи друг друга.

Мероприятия по снижению трещинообразования:

- выявление дефектов сварных швов ультразвуковым и рентгеноскопическим контролем во время изготовления металлоконструкций [64-66];

- уменьшение концентрации напряжений посредством тщательной внешней механической обработки сварных швов [64-66];

- уменьшение нагрузок на металлоконструкции до уровней $25 \div 30$ % от стопорных величин путем введения в систему электроприводов устройств, обеспечивающих уменьшение максимальных токов в электросистемах экскаваторов [64-66];

- работа машины на средних режимах [64-66].

1.3 Оценка надежности работы металлоконструкций

Несмотря на многочисленные исследовательские работы на сегодняшний день отсутствуют реальные методики по определению тех. состояния металлоконструкций экскаваторов, критериев их нормальной работы, постановки на ремонт и замены на новые.

Наиболее наглядно описывает надежность машин U-образная кривая надежности – временная зависимость числа поломок (рисунок 1.8).

Однако зависимость не выражается формулами, которые можно применить для практических расчетов.

Названная кривая состоит из трех участков (рисунок 1.8).

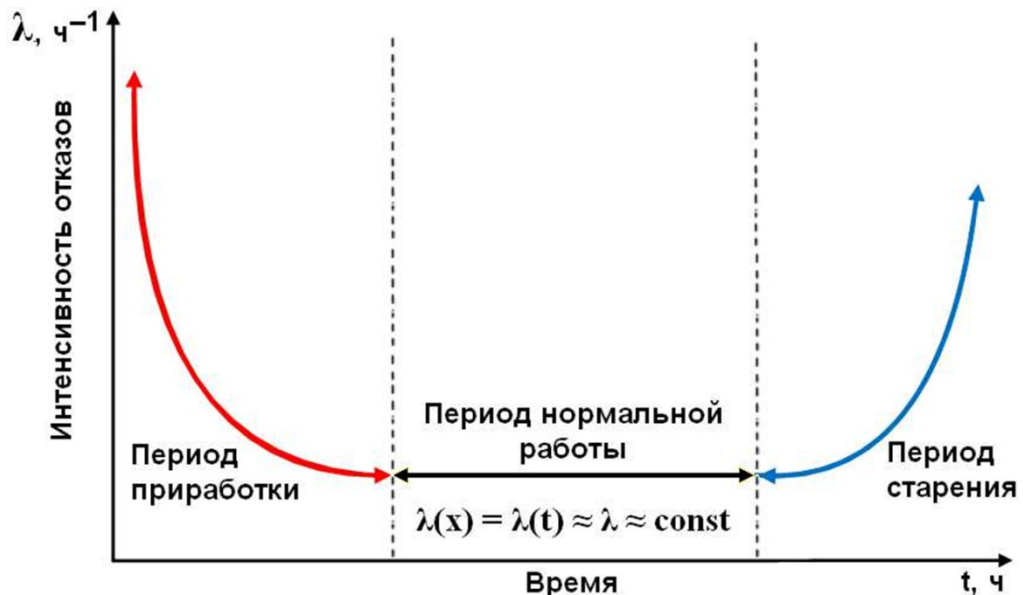


Рисунок 1.8 – U-образная кривая надежности с тремя характерными участками

В период приработки Δt_1 отказы металлоконструкций технической системы происходят по причинам скрытых внутренних дефектов, ошибок производства и неопытности оператора.

На втором участке U-образной кривой в период времени Δt_2 осуществляется эксплуатация технической системы в условиях нормального работоспособного функционирования. В этот период времени наработки отказы металлоконструкций технической системы носят в основном внезапный случайный характер и подчиняются экспоненциальному распределению вероятностей возникновения отказов, которое является частным случаем распределения Вейбулла.

Продолжительность этого периода зависит от среднего срока службы элементов и условий эксплуатации. В рамках общей стратегии управления предприятием следует стремиться к максимальному увеличению продолжительности этого периода.

Третий участок U-образной кривой Δt_1 связан с ресурсными характеристиками металлоконструкций технической системы. Интенсивность отказов в течение этого периода растет по причинам усталости металла и подчиняется нормальному распределению вероятностей возникновения отказов.

С точки зрения наибольшей экономической выгоды угольных разрезов и карьеров необходимо, чтобы экскаваторы работали как можно дольше, но при этом не имели бы аварийных ремонтов, т.е. необходимо отдалять период старения металла металлоконструкций, а период нормальной эксплуатации продлевать, тем самым увеличивать период после которого требуется дорогостоящая замена оборудования. Для этого требуется знать, когда проводить технические ремонты и с малыми экономическими потерями восстанавливать полную работоспособность экскаваторов.

Наиболее важной проблемой угледобывающей отрасли Вьетнама, является старение парка различных машин, в том числе и экскаваторов. Закупка нового оборудования связана с его большой стоимостью и поэтому проводится редко, в крайних случаях. Аналогичные проблемы существуют на угольных предприятиях Кузбасса и других угольных бассейнов РФ. АО ХК «Якутуголь» в 2018 году закупил два экскаватора ЭКГ-18 1,2 млрд. рублей.

Выгоднее вместо покупки нового оборудования устранять поломки посредством ремонтов, используя запасные части, закупленные или сохранившиеся на складах.

Большой износ имеют значительное число карьерных экскаваторов, достигающий 85%, в то время как желательно иметь не более 50%, что позволяло бы предприятиям нормально работать.

Понятие долговечности экскаватора может быть сформулировано следующим образом – это период его работоспособного состояния равного

суммарной наработке, с остановками на тех. обслуживание, и осуществление дополнительных ремонтов, предотвращающих аварийные ситуации, что сокращает или даже полностью ликвидирует ремонты от возникновения отказов в связи с отсутствием.

Исследования остаточного ресурса, усталости и долговечности проводилось во многочисленных работах [9, 28, 29 36, 44, 45, 47, 50, 53, 54, 96-99, 110]. В этих работах рассматриваются данные параметры с различных сторон.

С точки зрения надежности редняя продолжительность внепланового дополнительного ремонта выражается (1.3) [19]:

$$T_{\text{пр } j} = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} t_{\text{оп } j}, \quad (1.3)$$

где n_j – количество внеплановых дополнительных ремонтов j - го вида за расчетный период.

$\sum_{j=1}^{n_j} t_{\text{оп } j}$ – оперативное время.

При этом необходимо иметь выше перечисленные данные о составляющих временных затратах.

Средняя трудоемкость внепланового дополнительного ремонта имеет вид (1.4):

$$W_{\text{пр } j} = \frac{1}{n_j} \sum_{j=1}^{n_j} W_{\text{оп } j}, \quad (1.4)$$

где $W_{\text{оп } j}$ – трудоемкость выполнения одного внепланового превентивного ремонта j -го вида, чел./ч.

Проведение дополнительных неплановых ремонтов повышает– вероятность безотказной работы за рассматриваемый период, и снижает интенсивность отказов связанную с условной плотностью вероятности отказов, при нахождении металлоконструкции в нормальном состоянии.

Хотя количество и суммарная оперативная продолжительность внепланового превентивных ремонтов могут возрасти, но средняя оперативная

продолжительность и трудоемкость внепланового превентивного ремонта несравнимо ниже средней оперативной продолжительности ремонта после произошедшего отказа (1.5):

$$\begin{aligned} T_{\text{пр}j} &\ll T_{\text{р}j} \\ W_{\text{пр}j} &\ll W_{\text{р}j} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Коэффициент готовности K_{Γ} машины в этом случае за период нормальной работы есть отношение (1.6) [19]:

$$K_{\Gamma} = \frac{n_j}{\sum_{j=1} t_i} \bigg/ \left(\frac{n_j}{\sum_{j=1} t_i} + \frac{n_j}{\sum_{j=1} t_{\text{п}i}} \right). \quad (1.6)$$

где $\sum_{j=1}^{n_j} t_i$ – суммарное время работоспособного состояния,

$\sum_{j=1}^{n_j} t_i + \sum_{j=1}^{n_j} t_{\text{п}i}$ – суммарного времени при проведении дополнительных ремонтов.

Коэффициент стоимости эксплуатации определяется (1.7) [19]:

$$K_{\text{сэ}} = \frac{C_{\text{э}}}{C_0} \quad (1.7)$$

где $C_{\text{э}}$ – стоимость эксплуатации до капитального ремонта;

C_0 – стоимость горного оборудования.

$K_{\text{сэ}}$ позволяет оценивать затраты на сохранение надежности металлоконструкций экскаваторов в ходе их работы.

В связи со снижением числа отказов и соответственно затрат, связанных с возникновением и ликвидацией отказов величина коэффициента стоимости эксплуатации при проведении превентивных ремонтов резко снижается (1.8) [19]:

$$K_{\text{сэп}} \ll K_{\text{э}}. \quad (1.8)$$

Экскаваторы являются сложными техническими объектами, состоящими большого числа различных систем.

Эти системы выполняют различные задачи и объединяются для совместной работы, их элементы имеют такие же свойства.

Свойства элементов:

- 1) Элементы бывают простыми либо сложными в зависимости от использования, и элемент может иметь различную структуру;
- 2) Надежность элемента не складывается из надежности его подсистем, а вычисляется одновременно для всей структуры;
- 3) Работоспособность элемента можно повысить до изначального уровня в отдельности от других элементов.

Металлоконструкции экскаватора: стрела, рукоять и т.п., как сложная техническая система в принципе относятся к элементам высокой надежности. Однако поддержание их работоспособного состояния является достаточно весомым фактором, так как возникающие отказы приводят к катастрофическим последствиям и длительному дорогостоящему ремонту.

Отказы металлоконструкций по причинам возникновения и по своей физической природе являются эксплуатационными, вызываемые нарушением норм эксплуатации (несоответствующими горно-технологическими условиями, неправильными действиями оператора) связанными с разрушением металлоконструкции экскаватора.

По влиянию на безопасность работ эти отказы относятся к зависимым и опасным, когда возникновение отказа может привести к катастрофическим последствиям, а по сложности устранения – к трудноустраняемым в эксплуатационных условиях.

Режим функционирования существенно влияет на надежность металлоконструкций и может быть оценен коэффициентом нагруженности (1.9) [19]:

$$k_H = P_p / P_{\text{пд}}, \quad (1.9)$$

где P_p – рабочая нагрузка,

$P_{\text{пд}}$ – предельно допустимая нагрузка.

Существенных отличий при сравнении внезапных и постепенных отказов не обнаруживается, ввиду того, что внезапные отказы – это ненаблюдаемое накопление повреждений в результате многоцикловой или малоцикловой усталости материала, в конечном итоге заканчивающиеся доломом конструкции.

В отдельных случаях возможны некоторые сочетания нагрузок приводящих к разрушению.

Обобщение воздействий различных нагрузок на конструкции экскаваторов в ходе их работы позволяет добиваться необходимой надежности сложной технической системы.

1.4 Постановка цели и задач исследования

Обзор литературных источников показал:

- разработанные научные методы дают возможность рассчитывать экстремальную нагрузку на ковш экскаваторов при разработке малопрочных пород;
- известные методы дают возможность для расчета усталостную прочность металлоконструкций карьерных экскаваторов без наличия трещин;
- имеются в использовании методы расчета долговечности металлоконструкций роторных экскаваторов при экскавации пород средней крепости.

Установлено дополнительно, что отсутствует в литературных источниках:

- данные о механической нагруженности экскаваторов со средним размером ковша при разработке взорванных скальных и невзорванных горных пород;
- методики по оценке картины напряженно-деформированного состояния металлоконструкций экскаваторов при разработке скальных пород;
- методы расчета долговечности металлоконструкций средних экскаваторов в роста усталостных трещин.

Цель работы

Повышение надежности карьерных экскаваторов на горных предприятиях Вьетнама посредством проведения предупреждающих ремонтов их металлоконструкций, что уменьшает время приведения экскаваторов в нормальное состояние, создает необходимый уровень технической готовности и сокращает эксплуатационные расходы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

1. Оценить экскаватор, как сложную техническую систему и выявить наиболее критические элементы металлоконструкций, влияющие на число отказов работы машины;
2. Оценить нагруженность выявленных критических элементов металлоконструкций экскаваторов;
3. Провести экспериментальные исследования и имитационное моделирование критических металлоконструкций экскаваторов при помощи конечно-элементного способа;
4. Разработать практические мероприятия по продлению срока безопасной эксплуатации и своевременной постановке экскаваторов на ремонт.

1.5 Выводы по главе 1

Анализ литературных источников показал что:

1. Высокая фондовооруженность, металлоемкость и стоимость экскаваторов требует выработки правильной стратегии в отношении закупок новых экскаваторов, а именно, на основе практики горных предприятий необходимо вместо новых закупок поддерживать работоспособность экскаваторов имеющихся в наличии;
2. Анализ отказов экскаваторов, как сложных технических систем показал, что работоспособность машины зависит от надежной работы их металлоконструкций; наиболее весомый вклад в поток отказов вносят такие металлоконструкции, как стрела экскаватора и двуногая стойка;
3. Обзор результатов научных исследований позволил установить существование влияния грансостава взорванных пород и коэффициента разрыхления на механическую нагруженность металлоконструкций экскаваторов, однако конкретные цифровые зависимости о числе циклов нагружений, величинах амплитуд и их числе при работе экскаваторов ЭКГ-10 отсутствуют;
4. Отсутствуют сведения о параметрах циклического нагружения при разработке экскаваторами невзорванных пород;
5. Отсутствует разработанная методика по оценке долговечности металлоконструкций карьерных экскаваторов типа ЭКГ-10.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ

2.1 Экспериментальное определение напряжений в исследуемых объектах тензометрическим способом

Теоретические модели нагружения, созданные с помощью компьютерных программ и аналитические модели должны быть обязательно проверены экспериментальным способом. Экспериментальные исследования, в свою очередь, позволяют развивать теоретические исследования, способствуя выбору для них верного направления.

Методики по определению напряжений в объектах основаны на экспериментальном определении деформаций в конструкциях при их нагружении, и оценки существующих остаточных деформаций, с последующим пересчетом деформаций в напряжения при помощи закона Гука.

Существующий тензоспособ позволяет определять деформации при различных видах нагружения и различных напряженных состояниях объекта[24, 104, 107].

Тензоспособ основан на применении тензорезисторов (ТР), сообщающих информацию спецприборам – измерителям деформаций (ИД) о средних деформациях с базы ТР.

ТР выпускаются на бумажной или фольговой основе, с различными размерами и является резистором, который защищен снаружи защитным слоем.

Резистором в ТР служит проволока со свойством менять свое сопротивление при деформировании (рисунок. 2.1).

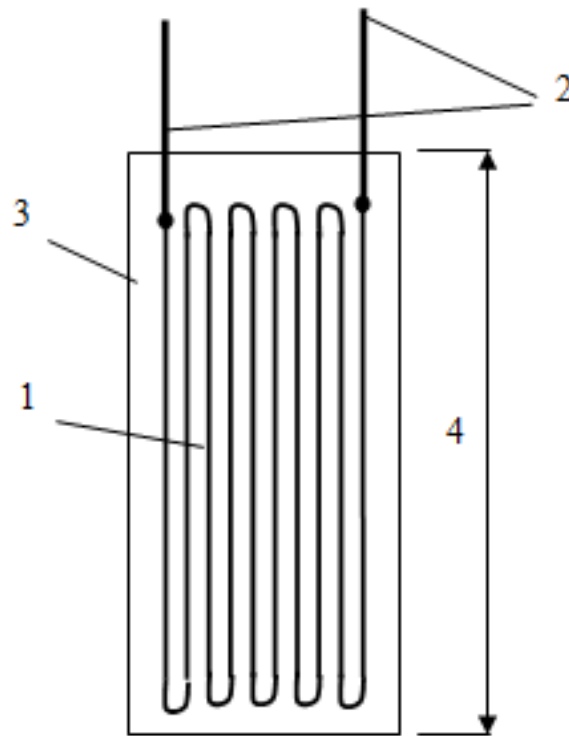


Рисунок 2.1 – Тензорезистор: 1 – сопротивление; 2 – выводы; 3 – бумажная или фольговая основа; 4 – длина ТР.

Деформации объекта при нагружении в зоне расположения ТР передается ему, при этом изменяется сечение проводника, а вместе с ним и омическое сопротивление ТР.

Омическое сопротивление ТР вычисляется (2.1):

$$R = \rho \frac{l}{F} \quad (2.1)$$

где ρ – коэффициент удельного сопротивления,

l – длина проволоки;

F – площадь сечения проволоки.

Деформация ТР находится (2.2):

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{n R} \quad (2.2)$$

где ΔR – увеличение или уменьшение электросопротивления ТР при его нагружении,

n – коэффициент тензочувствительности.

Коэффициент n находится путем сравнения изменений сопротивления ТР и относительных деформаций при нагружение тарировочной балки (2.3):

$$n = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} \quad (2.3)$$

Определение ε производится из формулы (2.2).

При определении деформаций для увеличения мощности получаемого сигнала ТР объединяются тензоизмерительный мост и добавляется тензоусилитель (рисунок 2.2).

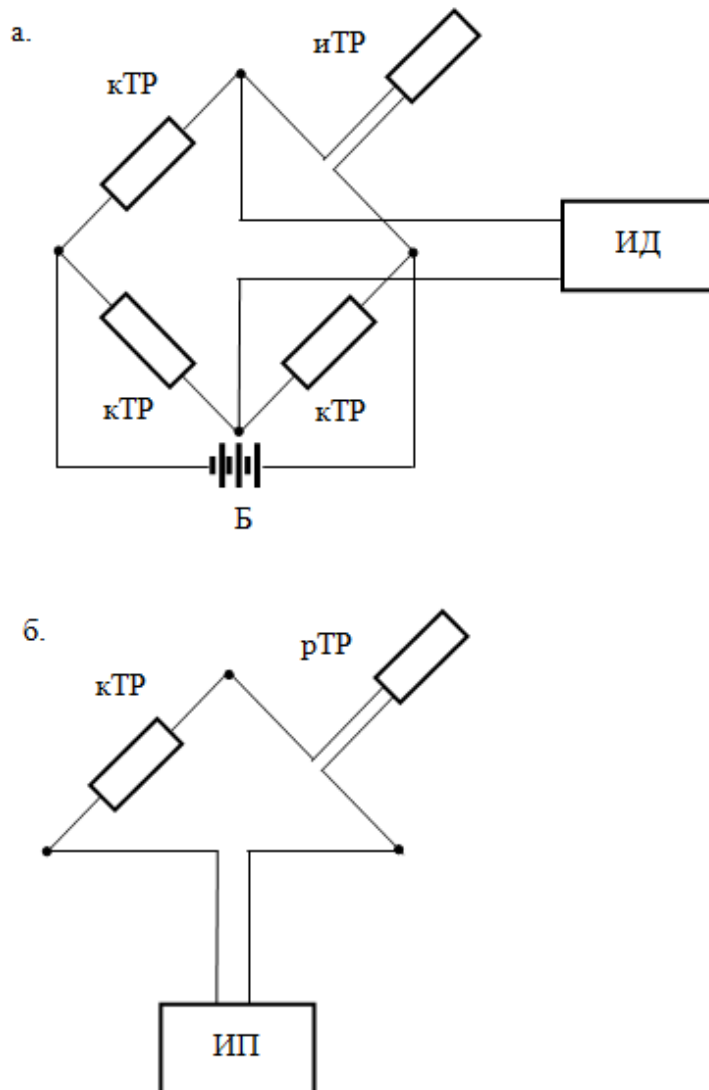


Рисунок 2.2 – Варианты подключения ТР: а – мостовая схема; б – полумостовая схема;

Б – батарея; ИП – измерительный прибор; иТР – измеряющий ТР;

кТР – компенсационный ТР.

Мостовая схема и полумостовая схема позволяют получать данные с одинаковой точностью, однако мостовая схема применяется в лабораториях, а полумостовая благодаря своим преимуществам при натурных испытаниях.

Нагружение приводит влиянию на pTP и изменению его сопротивления, это приводит к дисбалансировке моста Уитстона, что фиксируется ИТ. Деформации определяются (2.4):

$$\varepsilon = C \Delta\lambda \quad (2.4)$$

где C – цена деления шкалы гальванометра,

$\Delta\lambda$ – разность отсчетов по шкале.

При натурных исследованиях вместо гальванометра применяют шлейфовый осциллографом или графопостроитель и теноусилитель (см. рисунок 2.2, а).

Использование компьютерных программ привело к применению аналого-цифрового измерителя деформаций и полумостовой схемы с исключением тензоусилителя (см. рисунок 2.2, б).

Мгновенный опрос может сто точек.

Нагружаемые объекты исследуются нижеследующим способом.

В зонах максимальных деформаций располагают ТР.

Для того чтобы не разрушить объект его нагружают постепенно, проверяя возникающие напряжения и сравнивая их с допускаемыми.

При ЛНС деформации преобразуют в напряжения с помощью закона Гука для линейно-напряженного состояния (2.5):

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.5)$$

где E – модуль Юнга.

После эксперимента оценивают состояние объекта.

Исследование остаточных напряжений производят методом разгрузки. Вокруг ТР создают канавки с помощью обсерливания малым сверлом. Деформации бывшие в материале обнуляются и это фиксирует ТР (рисунок 2.3).

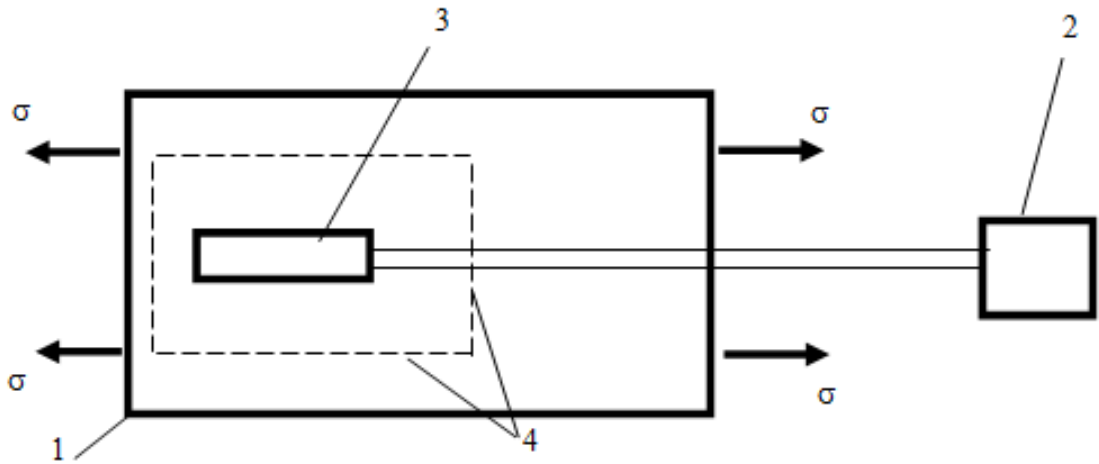


Рисунок 2.3 – Удаление остаточных деформаций при помощи обсерливания:
1 – изучаемый объект; 2 – ИД; 3 – ТР; 4 – углубления в металле объекта от обсерливания

Для определения остаточных напряжений так же используется закона Гука, которые складываются напряжениями от внешнего нагружения. Восстановление поверхности производят при помощи шлифования.

При сложном деформировании объекта, используют розетки из двух или трех ТР.

Розетки из 2-х ТР применяют, если направления максимальных и минимальных деформаций известны, ТР наклеивают вдоль них (рисунок 2.4).

В результате эксперимента находятся максимальные и минимальные деформации.

Максимальные и минимальные напряжения определяют из системы уравнений (2.6):

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 - \mu \cdot \varepsilon_3) \\ \sigma_3 = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_3 - \mu \cdot \varepsilon_1) \end{cases} \quad (2.6)$$

где σ_1 и σ_3 – главные напряжения;

μ – коэффициент Пуассона.

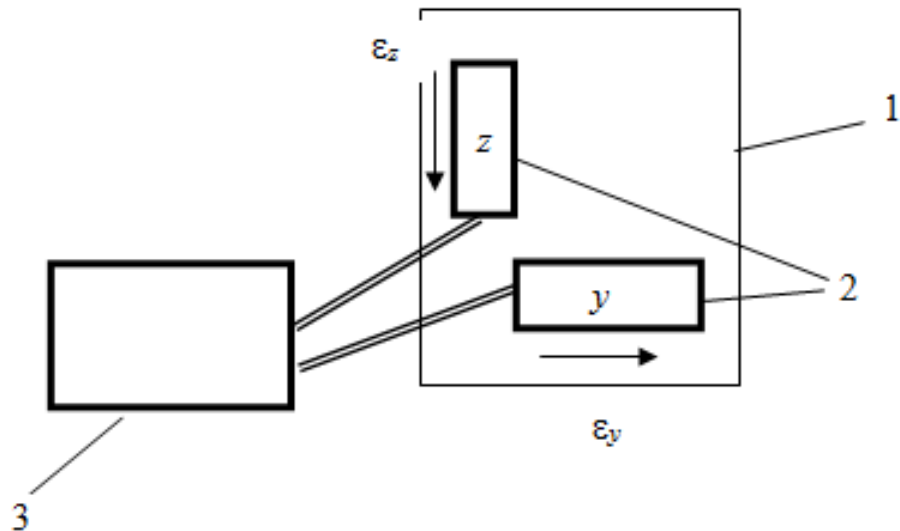


Рисунок 2.4 – Схема наклейки ТР по направлениям максимальных и минимальных деформаций: 1 – изучаемый объект; 2 – ТР; 3 – измеритель деформаций.

Эквивалентные напряжения рассчитывают по теориям прочности. Проверку прочности производят, сравнивая полученные напряжения с допускаемыми напряжениями.

Хрупкий материал обычно проверяется по гипотезе Кулона-Мора (2.7):

$$\sigma_{\text{экв.М}} = \sigma_1 - k \sigma_3 \leq [\sigma]^+ \quad (2.7)$$

где k – отношение допускаемого напряжения материала работающего на растяжение допускаемому напряжению материала, работающего на сжатие.

Пластичные материалы проверяются по двум теориям:

- энергетической (2.8):

$$\sigma_{\text{экв.IV}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma]. \quad (2.8)$$

- наибольших касательных напряжений (2.9):

$$\sigma_{\text{экв. III}} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (2.9)$$

Розетки из 3-х ТР применяют, когда неизвестно как направлены максимальные и минимальные деформации (рисунок 2.5).

Розетка располагается произвольно, однако, в виде, показанном на рисунке 2.5.

Измерительным прибором определяют деформации, которые не являются главными.

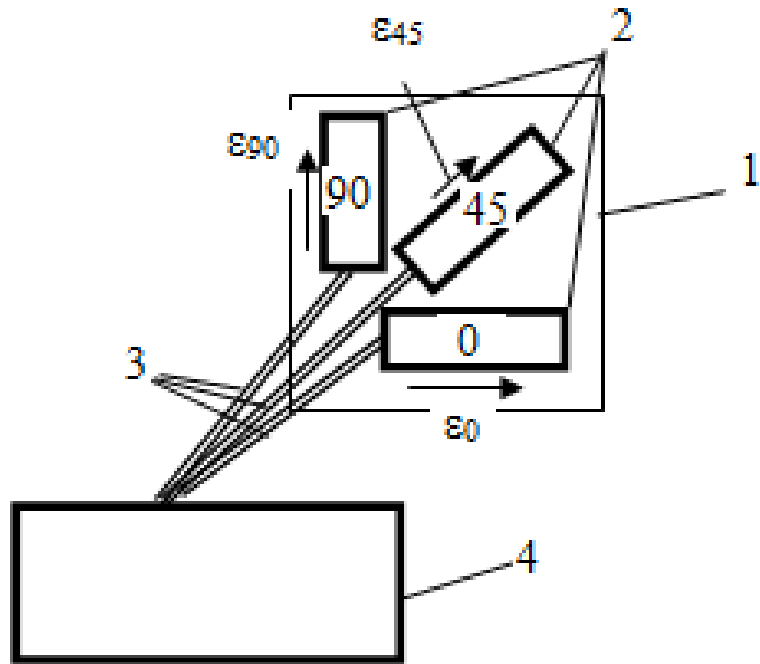


Рисунок 2.5 – Схема наклейки ТР произвольным способом: 1 – изучаемый объект; 2 – ТР; 3 – измеритель деформаций.

Определяют линии действия главных деформаций (2.10):

$$\operatorname{tg}(2\alpha) = -\frac{\varepsilon_0 - 2\varepsilon_{45} + \varepsilon_{90}}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}} \quad (2.10)$$

где $\operatorname{tg}(2\alpha)$ – тангенс угла между линией ТР "0", и линией максимальной главной деформации – ε_1 .

Главные деформации находятся (2.11):

$$\varepsilon_{1,3} = \varepsilon_{\max \min} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2} \quad (2.11)$$

При помощи найденных главных деформаций, определяются главные (2.6) и эквивалентные напряжения (2.7), полученные эквивалентные напряжения сравниваются с допускаемыми.

При ударных и циклических процессах измерители не успевают замерять деформации, поэтому вместо них применяются осциллографы, с их помощью записывается осциллограмма в прямом режиме (рисунок 2.6).

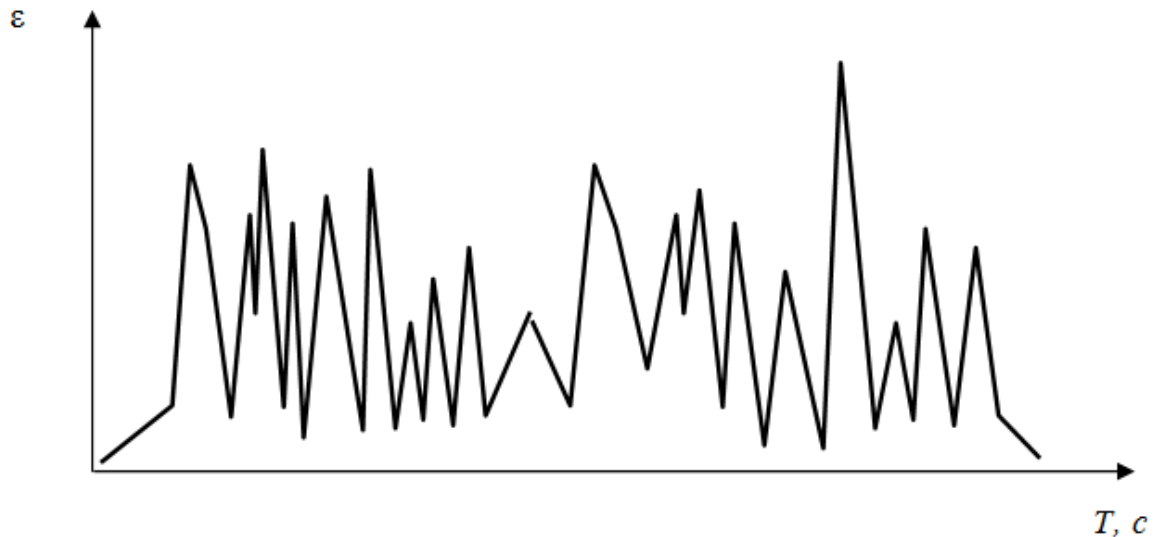


Рисунок 2.6 – Циклограмма нагружения объекта при записи на осциллограф

Фиксирование изменения деформаций может проходить в любых динамических режимах.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) связанный с компьютером позволяет все динамические процессы записывать и обрабатывать непосредственно в ходе испытаний.

Программа "компьютерный осциллограф" записывает процессы любой сложности и вида: ударные, циклические, статические. В связи с прогрессом вместо аналоговых измерителей деформаций используются компьютерные осциллографы.

Для определения долговечности металлоконструкций карьерных экскаваторов ЭКГ-10, проводилось исследование изменений напряженности их металлоконструкций при черпании взорванной породы со средними диаметрами кусков от 0,2 до 0,5 м.

В исследовании использовались аналого-цифровые преобразователи АЦП-ЦАП, тензодатчики и ноутбук.

Тензодатчики создавались посредством наклейки тензорезисторов на металлическую пластину. В качестве клеящего вещества использовались клеи БФ-2 и Циакрин, тензодатчики изолировались от погодных изменений гидроизолятором. Пластина с тензодатчиком приваривалась к поверхности

металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 с помощью сварочного аппарата (рисунки 2.7, 2.8).

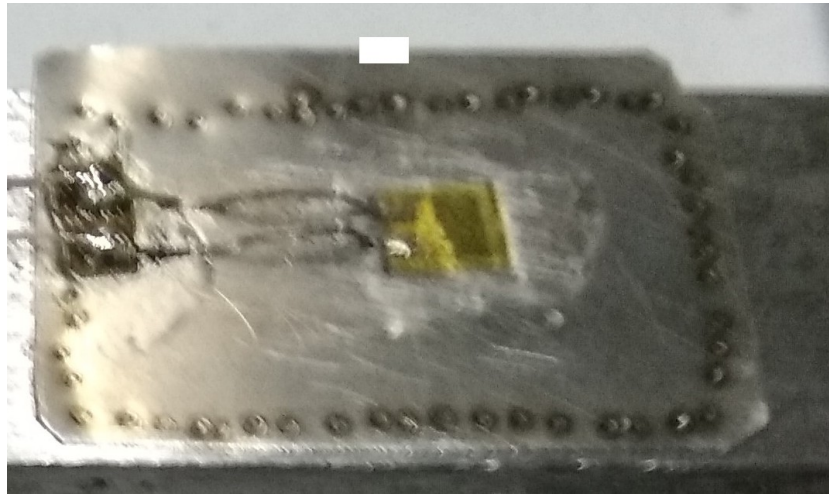


Рисунок 2.7 – Тензодачики для определения деформации металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при экскавации взорванных горных пород



Рисунок 2.8 – Сварочный аппарат для контактной сварки

В ходе экспериментов использовались две тензостанции, отличающиеся большей и меньшей защитой от электрических помех (рисунок 2.9).

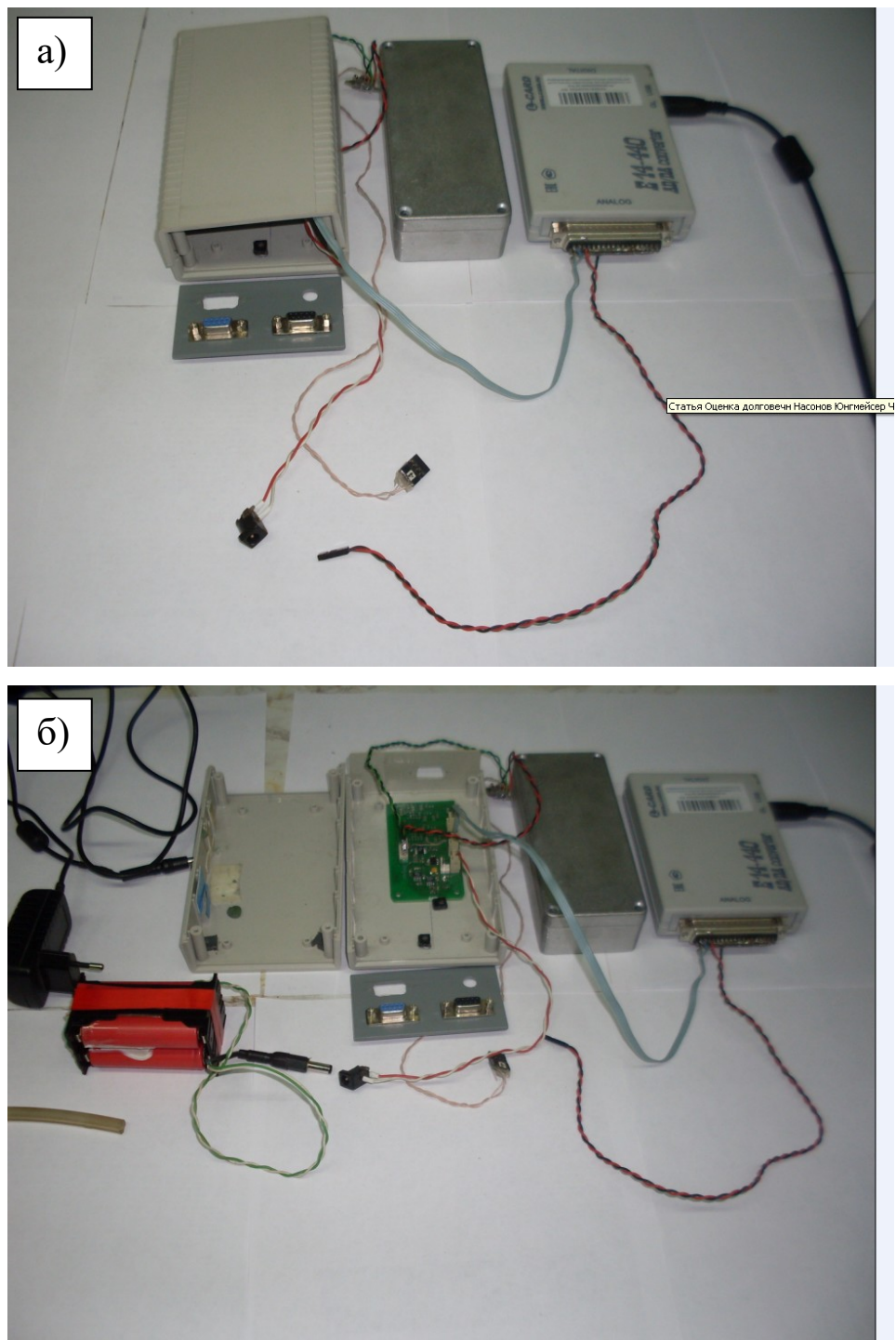


Рисунок 2.9 – Тензостанция 2: а – внешний вид; б – внутреннее содержание

Для экспериментов использовались тензорезисторы типа ФКПА-1-50 с сопротивлением $R = 52,0 \div 52,2$ Ом (рисунок 2.10).

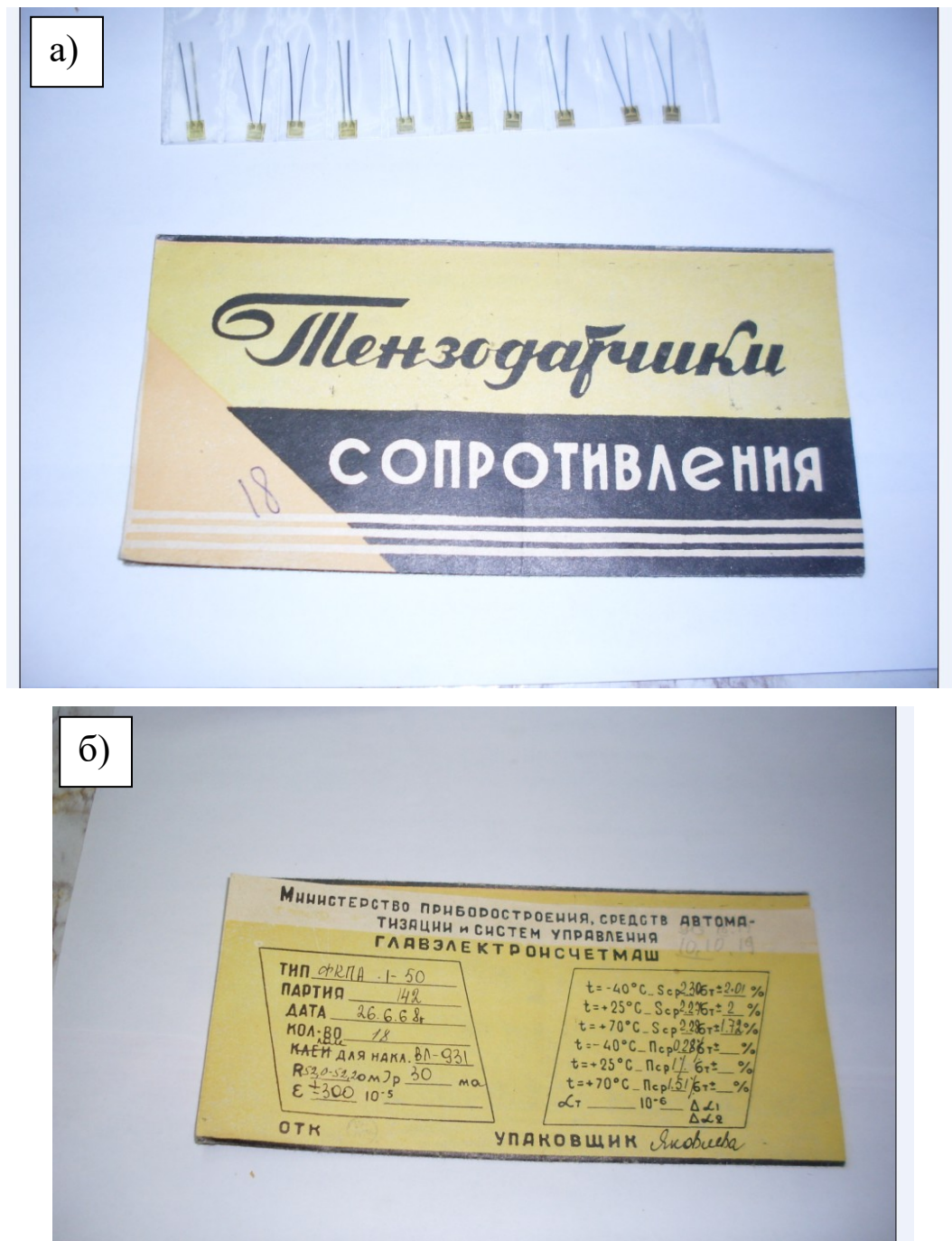


Рисунок 2.10 – Тензорезисторы, использовавшиеся для испытаний

Применялись конекторы для соединения выводов из тензорезисторов и электрических проводов, идущих на тензостацию (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 – Конекторы для соединения тензорезисторов и проводов

Полученные сигналы деформаций конструкций обрабатывались аналого-цифровым преобразователем и передавались на компьютер. Для этого использовалась программа «Многоканальный осциллограф» (рисунок 2.12), позволяющая отображать и записывать информацию, поступающую от тензодатчиков.

На экране параллельно движется несколько осциллограмм.



Рисунок 2.12 – Пример осциллограммы

Задачи программы:

1. Отображение сигналов, поступающих с датчиков;
2. Задание длительности записи;
3. Задание частоты сигналов;
4. Изменение числа сигналов;
5. Изменение масштаба;
6. Остановка изображения;
7. Запись осциллограммы;
8. Отображение абсолютного времени с момента запуска модуля АЦП или с момента начала воспроизведения сигналов из файлов;
9. Синхронизация осциллограмм.

Тарировка тензорезисторов производилась на тарировочной балке, при ее нагружении задавалась изгибная деформация.

Прогиб балки (2.12):

$$\lambda = P l^3 / (48EI_x) \quad (2.12)$$

где P – приложенная сила к середине балки,

l – пролет,

I_x – осевой момент инерции.

Сечение балки имело форму прямоугольника с шириной b и высотой h . Момент инерции вычислялся (2.13):

$$I_x = bh^3 / 12 \quad (2.13)$$

Относительная деформация тензорезистора определялась (2.14):

$$\varepsilon = 3Pl / 2Ebh^2 \quad (2.14)$$

2.2 Методика определения параметров развала при подготовке к экскавации

Взаимодействие ковша с развалом взорванных пород приводит к возникновению всплесков напряжений в металлоконструкциях экскаваторов характеризуемых числом всплесков и их амплитудой. Число и амплитуда зависит от состояния развала пород, при этом в нем меняются параметры в зависимости от качества взрывной подготовки, т.е. объема и качества взрывчатого вещества.

Взрывная подготовка горных пород имеет два параметра:

1. Степень дробления,
2. Параметры развала.

Данные параметры определяют механическую нагруженность экскаватора [40].

Степень дробления характеризуется:

1. грансоставом,
2. диаметром среднего куска,
3. выходом негабарита.

Грансостав – это распределение в развале кусков породы по крупности и числу.

Диаметр среднего куска в развале определяется (2.15):

$$d_{cp} = \sum x_i \cdot \gamma_i \quad (2.15)$$

где x_i – среднее арифметическое значение i -ой фракции,

γ_i – объем i -ой фракции,

d_{cp} – зависит от типа экскаватора и блочности взрывааемых пород.

Негабарит – это отношение ширины ковша и экскаватуемого куска породы, обычно это 0,6 от ширины ковша, данная фракция вычисляется в процентах.

Негабаритные куски породы, плохо разрабатываются, и поэтому их приходится дополнительно взрывать.

Разработка забоя проходит с наименьшими нагрузками на металлоконструкции экскаватора при больших значениях коэффициента разрыхления.

Для этого коэффициент должен находиться в пределах $1,3 \div 1,4$.

Для теоретического определения грансостава и среднего диаметра куса породы в развале необходимо их увязать с дроблением пород при взрыве.

Радиус зоны дробления при взрывах определяется (2.16):

$$R = 300 r / \sqrt{\sigma} \quad (2.16)$$

где r – радиус скважинного заряда,

σ – предел прочности породы при сжатии.

Распределение взорванной породы выражается функцией (2.17) [3]:

$$u(x) = M_3(x) / M_3 \quad (2.17)$$

где $M_3(x)$ – момент от $x^k \cdot f(x)$ в пределах $(0, \infty)$;

M_3 – момент от $x^k f(x)$ в пределах $(0, x)$ [8].

Куски породы по размерам распределяются в соответствии с экспоненциальным законом, распределение имеет плотность (2.18) [8]:

$$f(x) = \exp(-x/M_1) / M_1 \quad (2.18)$$

Моменты (2.19) [8]:

$$M_K = K! \cdot M_1^K \quad (2.19)$$

Функцией гранулометрического состава имеет вид (2.20) [8]:

$$V(x/M) = 1 - \exp(-x/M) \cdot (1 + x/M + (x/M)^2/2 + (x/M)^3/6) \quad (2.20)$$

Проверка грансостава должна проверяться фотопланиметрическим способом.

2.3. Способы обнаружения трещиноподобных дефектов

Для оценки состояния металлоконструкций используются различные способы и методы [89, 105, 107-109].

1. Визуально измерительный контроль (ВИК) сталей и сварных швов – это контроль для обнаружения внешних трещин, коррозии металла, депланаций, и

т.д., полученных при работе машины. С помощью визуально измерительного контроля проверяют размеры элементов объектов, соответствие проекту, ГОСТа и т.д.

2. Контроль проникающими веществами (капиллярный контроль) позволяет наглядно определить наличие трещин, как в основном, так и в наплавленном металле сварных соединений, характер их развития на поверхности детали, а также определить негерметичные участки конструкции.

- Перед контролем необходимо проводить:
 - снятие с внешней стороны исследуемого объекта пыли и грязи;
 - удаление содержимого из поверхностных повреждений;
 - сушку объекта.
- Процесс обнаружения сквозных и поверхностных трещин заключается в следующем:
 - внедрение в повреждение спец. вещества яркой окраски;
 - исключение лишнего вещества;
 - добавление проявляющего вещества.
- Внедрение в повреждения спец. веществ производится посредством:
 - протирания поверхности конструкции;
 - струйным способом;
 - напылением.

3. Ультразвуковой контроль – это наиболее эффективный и наиболее распространенный способ, позволяющий обнаруживать как поверхностные, так и подповерхностные дефекты разного расположения и ориентации. Наиболее эффективен при исследовании сварных швов.

Различают 5 методов УЗК: резонансный, теневой, импедансный, свободных колебаний и эхо-метод [80].

Метод УЗК позволяет определять размеры, координаты, ориентацию дефекта в металлоконструкции.

- Подготовка конструкции к УЗК состоит в следующем:
 - в исключении наружных повреждений;

- в исключении наплавления металла;
- в зачистке окалины;
- в удалении лакокрасочного покрытия и грязевого слоя;
- в покрытие исследуемой поверхности спец. гелем.

Нахождение трещин выполняется при помощи ультразвукового аппарата и специального подвижного датчика.

4. Магнитопорошковый метод – это метод позволяющий определять у поверхности наличие трещин, расслоений металла, различных включений [51, 55].

- При магнитопорошковом методе контроля применяют способы в зависимости от магнитных свойств материала и необходимой чувствительности контроля:

- остаточной намагниченности;
- дополнительного поля.

- Для нанесения магнитного порошка на поверхность исследуемого объекта его применяют в различной форме:

- суспензии,
- порошка,
- пасты.

Суспензию на металлоконструкции наносят с помощью разбрызгивания либо полива.

Порошок наносят при помощи распыления.

Пасту наносят путем обмазывания.

Магнитные частицы концентрируются вокруг дефектов, создавая картину расходящихся от дефекта лучей.

5. Радиационный метод – это метод, позволяющий регистрировать снимки дефектов на пленках. Используется для обнаружения подповерхностных внутренних дефектов. Имеет недостаток: требует доступа к двум сторонам исследуемого объекта.

6. Вихретоковый метод – это метод, при котором контактируют поля вихревых токов внешнего магнитного поля. Используется для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов.

7. Акустико-эмиссионный метод – это метод, основанный на улавливании акустических сигналов издаваемых растущей трещиной. Это единственный метод позволяющий обнаруживать трещины в процессе работы машины.

Критерии списания машин

Принятие решения о постановке экскаватора на ремонт, составление планов технического обслуживания имеет определенные трудности, так как в точности неизвестно какое техническое состояние будет у экскаватора через определенное время. При составлении планов проведения ремонтов существует два подхода: в первом случае основываются на времени работы, во втором – на выполненных планах экскавации горной пород. И тот и другой подход не полностью удовлетворяет требованиям[1, 2, 17, 19, 52, 69, 74, 75, 88, 91-93].

Первый подход включает в себя общее время нахождения экскаватора на эксплуатационном участке и не учитывает времени реальной работы.

Второй подход, не учитывает фактических условий работы, качества подготовки пород к экскавации.

Однако кроме перечисленных факторов являются дополнительные – это техническими и технологическими факторами износа, которые снижают долговечность металлоконструкций.

Технологические:

1. Некачественная подготовка скальных пород взрывом;
2. Большой средний диаметр куска;
3. Низкий коэффициент разрыхления;
4. Значительное число негабаритных кусков.

Технические:

1. Изменение числа дефектов в металлоконструкциях в результате многоциклового и малоциклового нагружения;
2. Уменьшение рабочей части сечения вследствие роста трещин;

3. Создание дополнительных концентраторов напряжений посредством различных усилений конструкции;
4. Накопление сварных макро дефектов, микротрещин, концентраторов напряжений, из-за сварочных работ;
5. Возникновение дополнительных остаточных напряжений в результате ремонтов;
6. Изменение прочностных свойств металла в результате длительной эксплуатации.

Для списания экскаваторов необходимо рассмотреть следующие признаки: экономический, надежность, технологический и технический. Наиболее эффективными являются технический, дополнительными: экономический, надежность и технологический[25, 26, 36, 71].

Экономический. Списание экскаваторов связана с соотношением риска разрушения конструкции и риском значительных экономических потерь при несвоевременных ремонтах. Экскаватор может эксплуатироваться длительный период безаварийно, но для этого требуется выполнять ремонты с необходимой частотой.

Изменение уровня повреждений элементов конструкций экскаватора при его работе ведет к изменению длительности роста трещин от начального момента до момента разрушения в сторону сокращения, что требует учащения осмотров конструкций и соответствующих ремонтов.

Возросшее число ремонтов вызывает увеличение затрат приводит к уменьшению прибыли и увеличению затрат, т.е. изменению баланса между этими показателями в худшую сторону. Время между ремонтами в результате накопления повреждений постепенно сокращается, и эксплуатация экскаватора становится экономически не целесообразным и выгоднее экскаватор снять с эксплуатации и закупить аналогичный.

Данный критерий занимает основное место среди других критериев, в соответствии с существующей практикой ремонты экскаватора с заваркой трещин и заменой отдельных металлоконструкций с периодичностью раз в 6 месяцев и

чаще является экономически нецелесообразным. Несущие элементы экскаватора могут быть поменены с определенной выгодой лишь в первые $2/3$ периода работы, последний период эксплуатации экономически выгоднее заменить старый экскаватор на новый.

Надежностный. Списание экскаваторов производится на основе изменения надежности металлоконструкций экскаваторов. Рассматриваются все коэффициенты надежности, включая все коэффициенты, связанные с отказами.

Изменение параметров надежности собираются длительный период, желательно за весь период работы объекта. Параметры меняются в течении периода эксплуатации, рассматриваются период приработки, нормальной работы и период старения (рисунок 1.8). Во время нормальной работы объекта параметры надежности меняются незначительно, хотя на них влияют средние и капитальные ремонты. В период значительного накопления повреждений происходит резкое нарастание отказов, которые, несмотря на ремонты, не уменьшаются. Резкое изменение параметров надежности, особенно увеличение потока отказов, свидетельствует об исчерпанию ресурса машины и, по сути, говорит о необходимости замены машины на новую, что коррелирует с экономическим критерием.

Технологический. Списание экскаваторов связано со временем уменьшения выработки экскаватора, снижением времени работы, увеличением числа внеплановых ремонтов.

Недостатками экономического, надежностного и технологического критериев являются:

- большая трудоемкость;
- большое число документов для анализа;
- большой период наблюдений;
- большой объем расчетов;
- отсутствие возможности оценить реальное техническое состояние экскаватора.

Данные критерии определяют необходимость замены экскаватора с точки зрения прибыльности их эксплуатации, однако они не улавливают момента сокращения до минимума безаварийности работы.

Технический. Вопрос списания экскаватора ставится с точки зрения безопасности, на основе фактического технического состояния. Рассматривается и сравнивается скорость роста трещины в металлоконструкциях нового экскаватора и экскаватора проработавшего определенный период времени. В первом случае количество дефектов минимальное, во втором имеется значительное число дефектов, накопленных мелких повреждений, что приводит к увеличению скорости роста трещин.

Существует межосмотровый период эксплуатации экскаваторов, его длительность один год или немного более. Во время осмотра производится исследование всех сварных швов металлоконструкций экскаватора при помощи УЗИ способа или рентгеновского способа, возможно применение других способов описанных ранее. Проведение осмотров с остановкой экскаватора более часто возможно, но экономически затратно, поэтому применение более частых осмотров является редким.

В связи этим накопление повреждений может приводить к увеличению скорости роста трещин весьма значительно, объект может получить критическую трещину за период меньший, чем между плановыми ремонтами. Это приведет разрушению конструкции и аварийной ситуации. Оценка состояния производится на основе сравнения расчетного периода роста трещины и фактического.

Уменьшение межосмотрового периода до полугода возможно для отработавших свой нормативный срок эксплуатации возможно, но это уже является критическим с точки зрения экономики. Рост трещины до критического размера в роки меньше полугода делает невозможным эксплуатацию экскаватора.

Для оценки состояния металлоконструкций экскаваторов необходимо выбирать типичные зоны образования трещин. Рассчитывать теоретически длительность роста трещин в типичных условиях и сравнивать фактическую скорость трещины полученную при наблюдениях.

Имея и то и другое возможно оценивать перспективы работы экскаватора

2.4 Выводы по главе 2

1. Основным методом определения влияния параметров взорванных и невзорванных горных пород на изменение напряжений в металлоконструкциях экскаваторов является экспериментальный, основанный на измерении изменения деформаций тензометрическими датчиками.

2. Методика определения параметров развала пород при подготовке к экскавации основана на расчете размеров кусков и их количестве по прочности взрывааемых пород и количестве взрывчатого вещества. Проверка правильности расчетов производится при помощи планиметрического метода.

3. Обнаружение дефектов в металлоконструкциях может осуществляться различными способами, но наиболее эффективным является УЗК способ.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

3.1 Причины образования трещин в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10

Горно-транспортные машины пока рассчитываются на прочность и выносливость без учета наличия дефектов в их металлоконструкциях [27, 48, 54, 55, 57, 58, 110].

Проектирование металлоконструкций экскаватора с точки зрения прочности основано на подходе взаимодействия ковша с горной массой в виде срезания грунтовой стружки или породного слоя [22, 42].

Считается, что при погрузке породы в автосамосвал или перевалке породы нагрузочный цикл равен экскавационному циклу, а другие варианты не рассматриваются. В то время как столкновение ковша экскаватора с кусками пород или разрушение блоков массива создает дополнительные циклы нагружения.

Причины циклов нагружения при экскавации горных пород кроме стандартных, подразделяются на следующие виды:

- некондиционные куски породы;
- плотность развала, характеризуемая коэффициентом разрыхления;
- невзорванные блоки породы.

Некондиционные куски породы увеличивают нагрузку на металлоконструкции, и вызывает снижение долговечности.

Наблюдение за состоянием экскаваторов позволяет предотвращать ситуации, при которых обычный ремонт превращается в замену работавших экскаваторов на новые. С экономической точки зрения это большие затраты, в то время как затраты на систему наблюдений и расчетов несоизмеримо меньшие.

На состояние металлоконструкций экскаваторов оказывают влияние различные факторы [4-6, 17], наибольшее влияние оказывает нагрузка при разработке пород [15, 16, 25, 29, 30-32, 61, 64, 65].

При этом развитие трещин в критической ситуации, если они ранее не найдены и не просчитаны, может привести к разрушению конструкции.

Качество подготовки пород к экскавации оказывает значительное воздействие на длительность работы металлоконструкций экскаваторов, однако числовые зависимости получены не для всех случаев [72, 73, 76, 77, 111].

Исследования влияния основных параметров развала пород на долговечность металлоконструкций экскаваторов в течение продолжительного периода показали нижеследующие результаты. Увеличение среднего диаметра куска в развале пород в два раза с 0,25 до 0,5 м показало, что длительность развития трещин до критического размера сокращалась в 3,8 раза. Данные сведения дают основания утверждать, что взрывная подготовка самым активным образом влияет на безопасность работы экскаваторов.

При эксплуатации экскаваторов основными причинами разрушений металлоконструкций являются: неправильное проектирование и неправильная эксплуатация в равной пропорции [17, 67, 68].

Проблемы проектирования обычно вызываются недостаточным исследованием условий работы экскаватора, имеющимся научным набором фактов. Неправильная эксплуатация связана с пренебрежением проверки работ при изготовлении экскаватора и недостаточным вниманием при работе экскаватора к погодным условиям и качеству подготовки пород взрывом.

Наличие сварочных дефектов как то непровары корня шва, неметаллические включения поры и т.д. является основой для концентрации напряжений и источником микродефектов при циклическом нагружении. Как известно трещины образуются из микродефектов, которые превращаются в макродефекты и затем преобразуются в трещины. Трещины в начале имеют поверхностный вид, а затем преобразуются в сквозные, поэтому расчет их должен вестись в этом же порядке.

Проведенные исследования показали, что наибольшая часть отказов из общего числа приходится на металлические конструкции экскаватора ЭКГ-10 – 0,32 (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Распределение относительного потока отказов экскаватора ЭКГ-10 по узлам и причинам простоев

Среди металлических конструкций наибольшую часть отказов имеют рукоять и двуногая стойка: 0,35 и 0,16 соответственно (рисунки 3.2-3.3).

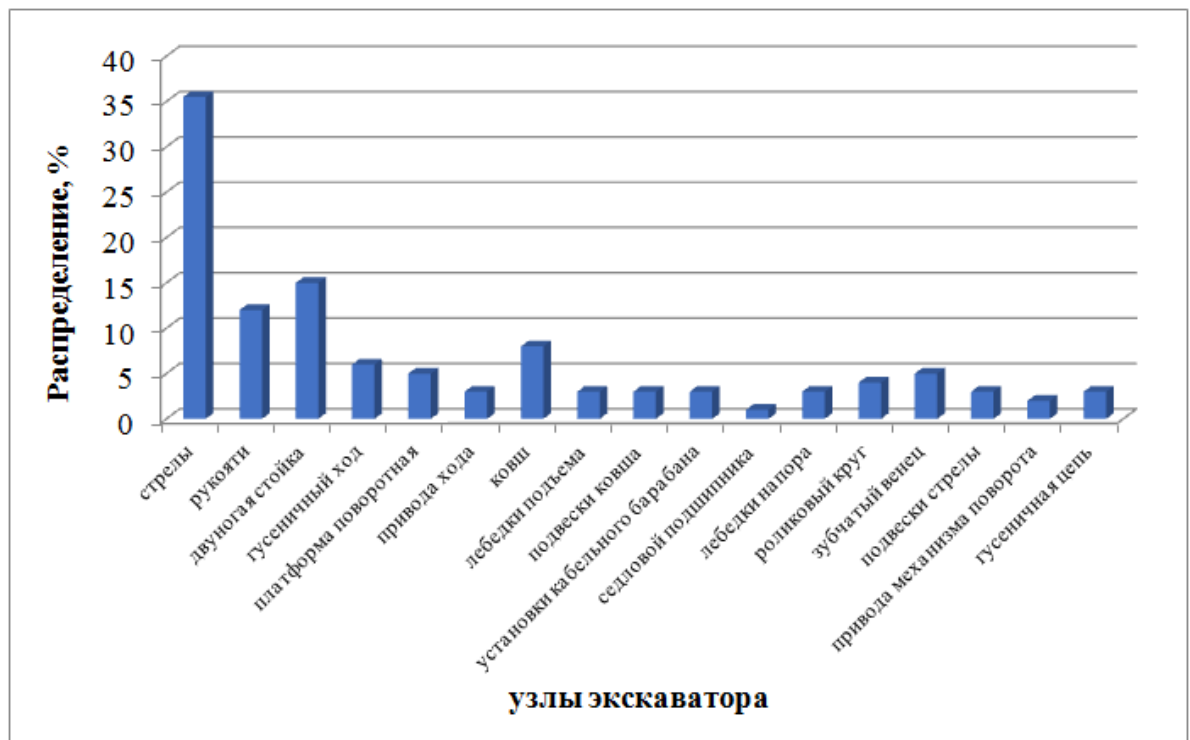


Рисунок 3.2 – Распределение относительного потока отказов по элементам металлоконструкций и механизмам экскаватора ЭКГ-10

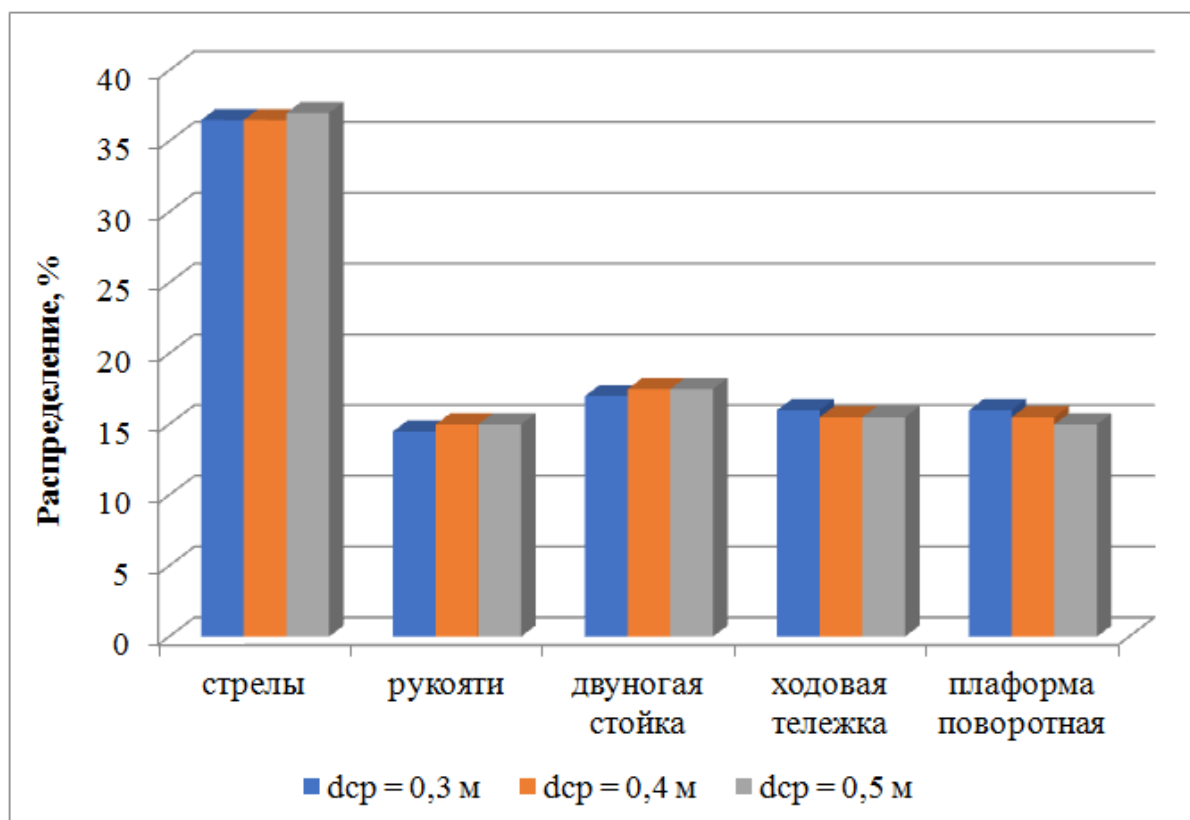


Рисунок 3.3 – Распределение относительного потока отказов по элементам металлоконструкций ЭКГ-10 в зависимости от подготовки пород к экскавации

3.2. Влияние параметров развала горных пород на уровень напряженное состояние металлоконструкций экскаваторов

Несмотря на исследования по нагруженности различных землеройных машин [73, 74, 106, 111-119] работ по взаимодействию ковша экскаватора с горными породами ограничено.

В результате были проведены экспериментальные исследования механической нагруженности карьерных экскаваторов типа ЭКГ-10. Экскаваторы исследовались при работе на взорванных и невзорванных породах различных предприятий Кузнецкого угольного бассейна открытой угольной добычи.

При этом породы относились к трем категориям блочности, что связано с их трещиноватостью [21].

Блоки невзорванной породы выделяются из массива большей глубиной и длиной трещин и отличаются размерами (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Общий вид блочности массива невзорванных пород

Для исследования влияния взрывной подготовки пород к экскаваторной разработке была выбрана классификация И.А. Паначева. Согласно его теории массивы состоят из мелкоблочных пород – со средним диаметром – 0,3 м; среднеблочных – 0,8 м и крупноблочных – 2 м (рисунок 1.2).

Крупноблочная категория пород для экскавации подготавливается взрывом, среднеблочная и мелкоблочная разрабатывается без взрывной подготовки.

В результате установлено, что экскавация пород после взрывной подготовки, при раскладке некондиционных кусков породы, приводит к значительным скачкам напряжений в металлоконструкциях экскаваторов, и меньшим – при наполнении ковша экскаватора кондиционной массой.

После отрыва ковша колебания напряжений в металлоконструкциях резко уменьшаются и доходят до минимума и снова возрастают при разгрузке (рисунки 3.5, 3.6).

Экскавация среднеблочных невзорванных горных пород приводит к всплескам напряжений в металлоконструкциях экскаваторов при движении ковша в массиве. При этом прохождение цельного блока вызывает всплески напряжений меньшие, по сравнению с всплесками в зоне перехода между блоками (рисунок 3.7).

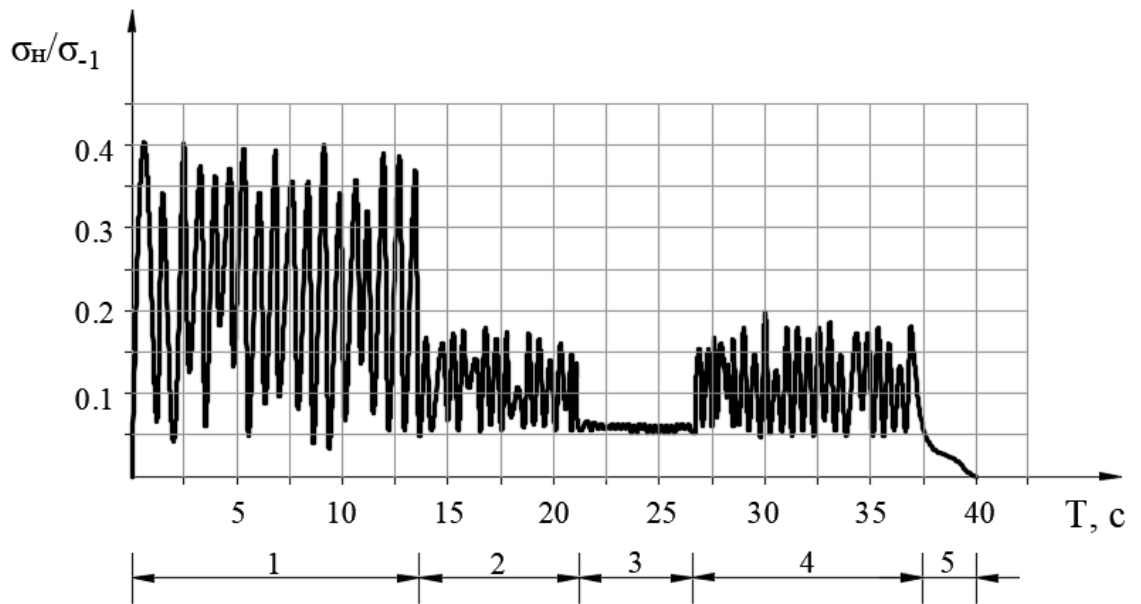


Рисунок 3.5 – Уровень нагруженности металлоконструкций ЭКГ-10 по циклам процесса экскавации взорванной горной массы (движение – **подъем ковша**): 1 – раскладка некондиционных и кондиционных кусков породы; 2 – наполнение ковша взорванной породой; 3 – поворот на разгрузку; 4 – выгрузка; 5 – поворот в забой

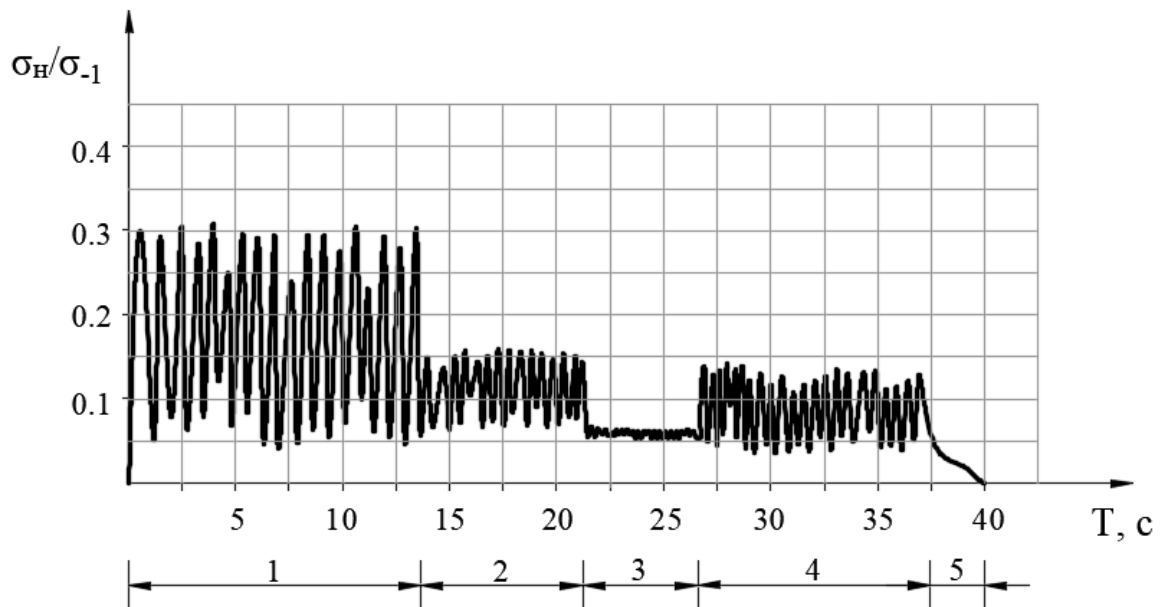


Рисунок 3.6 – Уровень нагруженности металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам процесса экскавации взорванной горной массы (движение – **напор ковша**): 1 – раскладка некондиционных и кондиционных кусков породы; 2 – дополнение ковша горной массой; 3 – поворот на разгрузку; 4 – выгрузка; 5 – поворот в забой

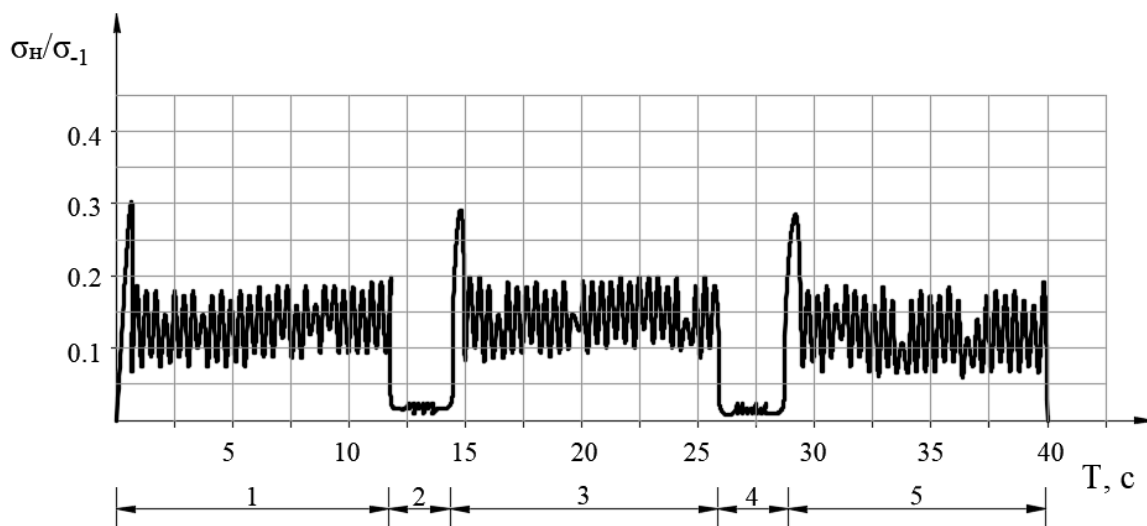


Рисунок 3.7 – Уровень нагруженности металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам в процессе экскавации **среднеблочной** невзорванной горной породы (напор ковша):

1 – I блок породы; 2 – межблочное пространство; 3 - II блок породы; 4 - межблочное пространство; 5 – III блок породы

Экскавация мелкоблочных невзорванных пород вызывает небольшие и равномерные всплески напряжений (рисунок 3.8).

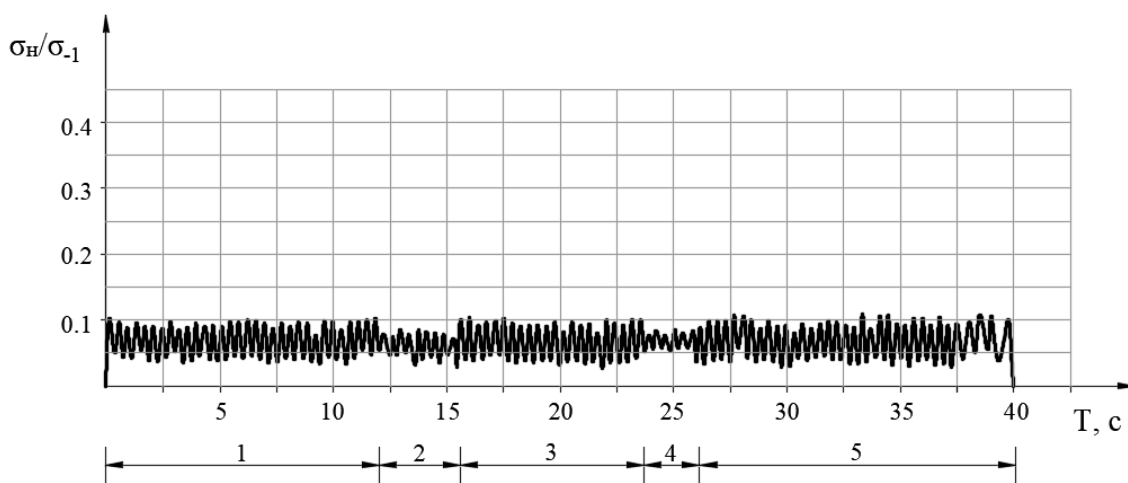


Рисунок 3.8 – Уровень нагруженности металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 по циклам в процессе экскавации мелкоблочной невзорванной горной породы (движение напор ковша): 1 – I блок породы; 2 – межблочное пространство; 3 – II блок породы; 4 – межблочное пространство; 5 – III блок породы

Качество подготовки взорванного массива к разработке и воздействие взорванных пород на напряжения в металлоконструкциях изучалась в рамках разных исследований [34, 37, 41].

Грансостав в развале связан с взрывной подготовкой, во многих случаях при взрывах остаются неразрушенные куски породы. В среднеблочных породах размер таких кусков может достигать длиной 0,8 м и шириной 0,4 м, в крупноблочных – 2 и 1 м [14, 31, 38, 39].

Такие куски трудно экскавируемы, так как их размеры сравнимы с размерами ковша ЭКГ-10 и их надо относить к некондиционным.

Число кондиционных кусков в развале пород с диаметром выше заданной величины может быть рассчитана на основе статистических моделей [7, 8] с учетом энергоемкости процессов взрыва [63] при помощи выражения (2.20).

Объем кусков в численном выражении, размер которых, превышает какую либо величину определяется (3.1):

$$n = 5V(e^{-x_0/M_1})/6M_1 \quad (3.1)$$

где V – объем всех кусков в развале пород.

M_1 вычисляется как средний диаметр куска в развале (3.2) [13]:

$$d_{cp} = 1/(1/d_\delta + (300 + h)q/(100 + d_{ск})), \quad (3.2)$$

где d_δ – размер блока в массиве,

h – высота взрываемого уступа,

$d_{ск}$ – диаметр скважины,

q – расход взрывчатого вещества.

В численном выражении объем некондиционных кусков породы может быть описан графиками (рисунок 3.9).

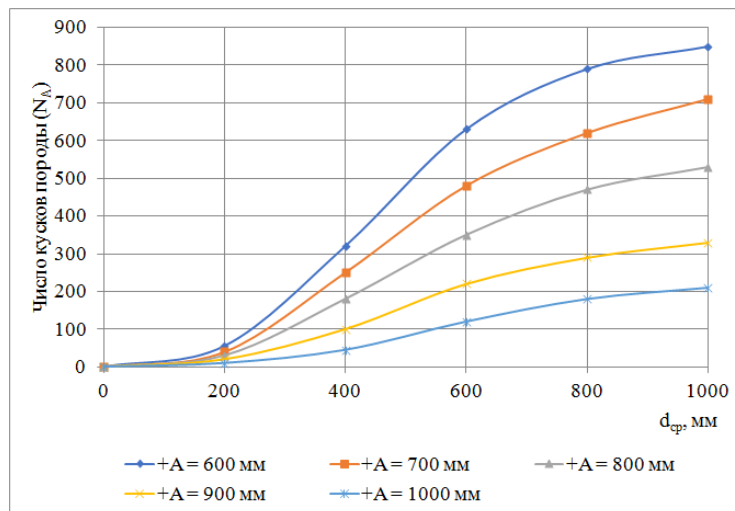


Рисунок 3.9 – Зависимость числа кусков породы от среднего диаметра куска в развале:

Некондиционные куски породы в ходе их разборки вызывают значительные напряжения и приводят к трещинообразованию. Эти куски неэкскавируемые их убирают с площадки, но в процессе уборки он развивают трещины гораздо значительней, чем кондиционные куски.

Максимальный размер куска, который можно экскавировать – это кусок с размером наибольшей стороны 0,6 от ширины ковша между боковыми стенками (рисунок 3.10).

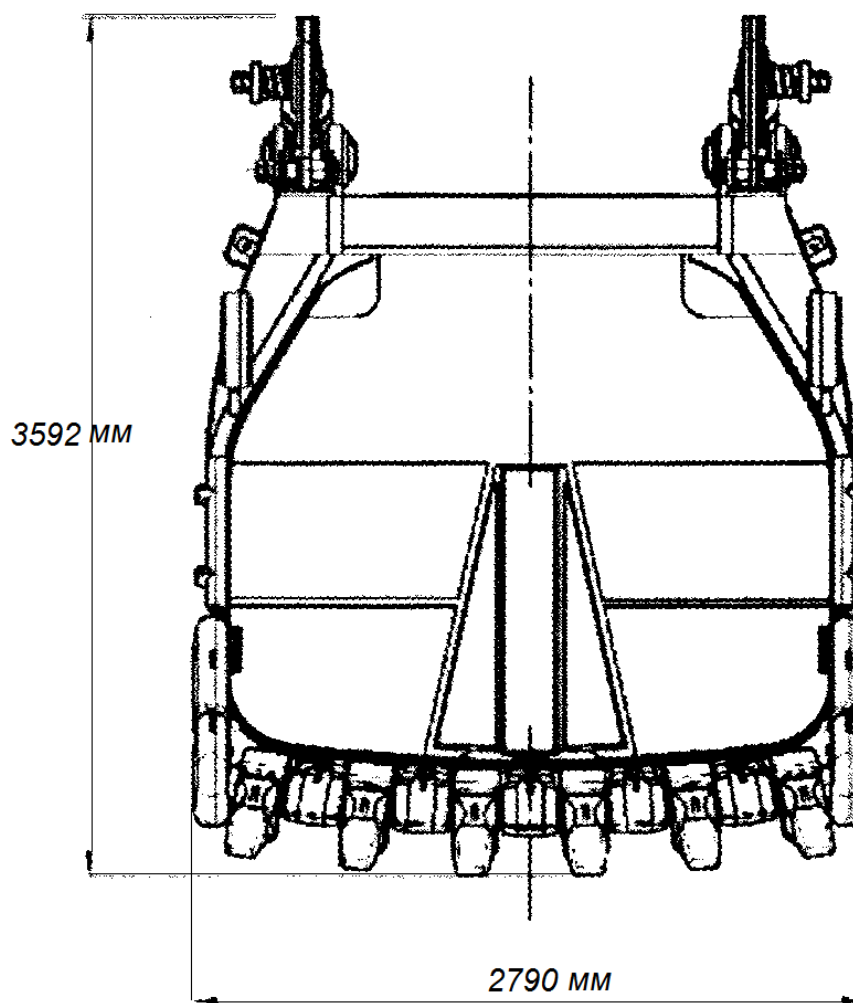


Рисунок 3.10 – Размеры ковша ЭКГ-10 емкостью 11,5 м

Алгоритм расчета долговечности, созданный на основе исследований, учитывает воздействие некондиционных кусков.

Столкновения ковша с кусками пород кондиционного размера вызывает напряжения небольшой величины, что являются недостаточным для зарождения трещины, но для уже развившейся трещины такие напряжения являются существенными.

Исследование механической нагруженности металлоконструкций экскаваторов проводилась при помощи тензометрирования при работе в местах с различным грансоставом: $d_{cp} = 0,2 \div 0,5$ м, $K_p = 0,3$. Изучалась работа наиболее нагруженных элементов стрелы и рукояти.

Исследования показали возрастание среднего диаметра куска в развале с 0,2 м до 0,5 м увеличивает максимальные усилия в стреле и рукояти 1,2 и 1,3 раза соответственно (рисунок 3.11).

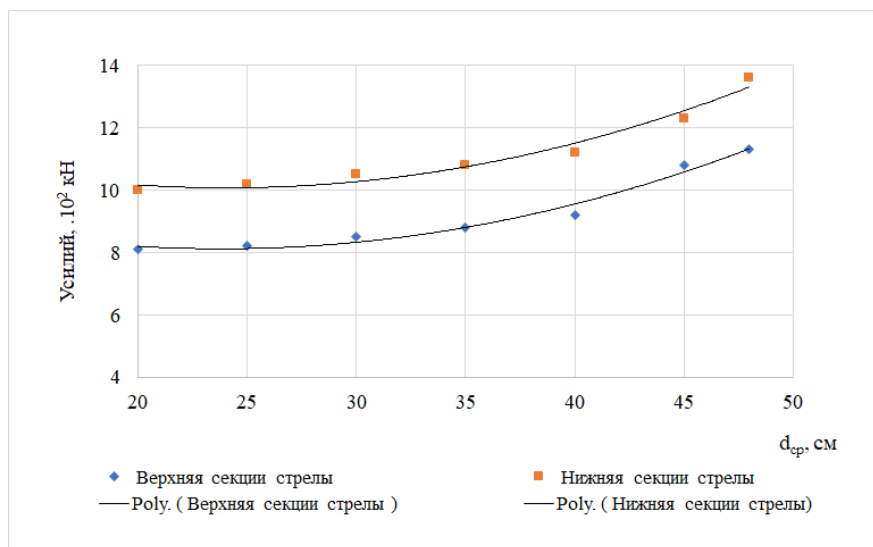


Рисунок 3.11 – Зависимость усилий в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10 от среднего диаметра куска

Установлено, что нагрузки металлоконструкций, рассматривая их при переносе ковша из забоя к месту выгрузки, распределяются согласно нормальному закону (рисунок 3.12).

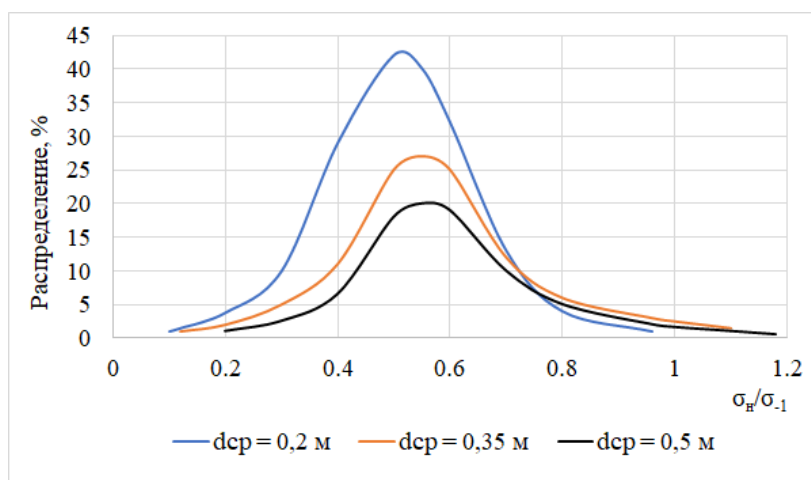


Рисунок 3.12 – Закон распределения напряжений, возникающих в стреле экскаватора ЭКГ-10 после отрыва ковша: $\Delta\sigma_H/\sigma_{-1}$ – отношение размаха номинальных напряжений к пределу выносливости; d_{cp} – средний диаметр куска

При разработке участков с диаметром куска выше среднего в диапазоне 0,3-0,5 м инициировалось преобразование многократно большего числа дефектов в трещины.

Установлено, что в основном металле сварных соединений рукоятей и стрел при работе в самых худших условиях напряжения не превышают предела выносливости. Имевшие место стопорные усилия также не создают эффекта образования трещин.

Трещинообразование происходит из-за наличия различных концентраторов напряжений, которые совместно с недопустимыми нагрузками создают напряжения значительно выше предела выносливости.

Исследования установили, что при работе экскаваторов в забоях соседним диаметром куска более 0,45 м наличествует значительное число всплесков напряжений – до одной шестой выше предела выносливости.

Избежание трещинообразования возможно при снижении нагрузок посредством увеличения объема используемого ВВ при взрывной подготовке.

В соответствие с требованиями Ростехнадзора наличие трещин в металлоконструкциях горных машин недопустимо, однако трещины при разработке экскаваторами тяжелых забоев образуются постоянно.

В то же время осуществлять ремонт непрерывно невозможно, должно оставаться время и на производственные процессы. Поэтому на разрезах руководство принимает решение о постановке экскаваторов на ремонт интуитивно, подстраиваясь по существующий план ремонтов, что в свою очередь создает неоднозначные ситуации, способные приводить к авариям.

Трещины в металлоконструкциях развиваются весьма продолжительно и дорастают до критического размера за длительный период, поэтому иметь алгоритм с помощью которого можно было бы определять продолжительность роста трещины до опасного состояния является очень важным.

Значительное влияние на нагруженность экскаваторов оказывает средний коэффициент разрыхления развала породы: для условий Вьетнама он может быть принят 1,35 [8, 12].

Однако для расчетов долговечности необходимо знать количество циклов с разной амплитудой в зависимости от K_p по слоям развала.

Уровень разрыхления пород влияет на все металлоконструкции, в том числе на стрелу и рукоять.

Развал пород можно разделить на три зоны: внешний слой, промежуточный слой и внутренний слой. Во внешнем слое сосредотачивались крупные куски породы, в нижнем – мелкие куски, которые создавали более плотную массу, и средний слой состоял из кусков среднего диаметра.

Нагрузки делились в соответствии с этой структурой развала. Большие нагрузки при разработке внешнего слоя, меньшие внутреннего слоя и снова увеличенные в нижнем слое.

При разработке внешнего слоя ковш экскаватора часто не может справиться с крупными кусками и их приходится отбрасывать. При этом возникают максимальные нагрузки. При разработке нижнего слоя более плотного, чем средний слой возникают эффекты с торможением ковша.

Установлено, коэффициент разрыхления меняется по слоям в глубине развала 1,1 на внешнем слое 1,5. Изменение нагрузок в элементах экскаватора коррелируют с изменением коэффициента разрыхления. При этом линейно возрастают и напряжения в элементах конструкций экскаватора.

Два параметра d_{cp} и K_p ведут увеличению напряжений в металлоконструкциях в 4 раза при увеличении d_{cp} с 0,1 м до 0,3 м и одновременном уменьшении K_p с 0,5 до 0,1 (рисунок 3.13)

В результате установлено, что трещинообразование и развитие трещин связано с экскавацией горных пород, которую можно разделить на следующие этапы:

1. Удаление крупных кусков породы с поля работы;
2. Черпанье оставшейся массы;
3. Подъем ковша, перемещение ковша к разгрузке, разгрузка ковша, возвращение в рабочую позицию.

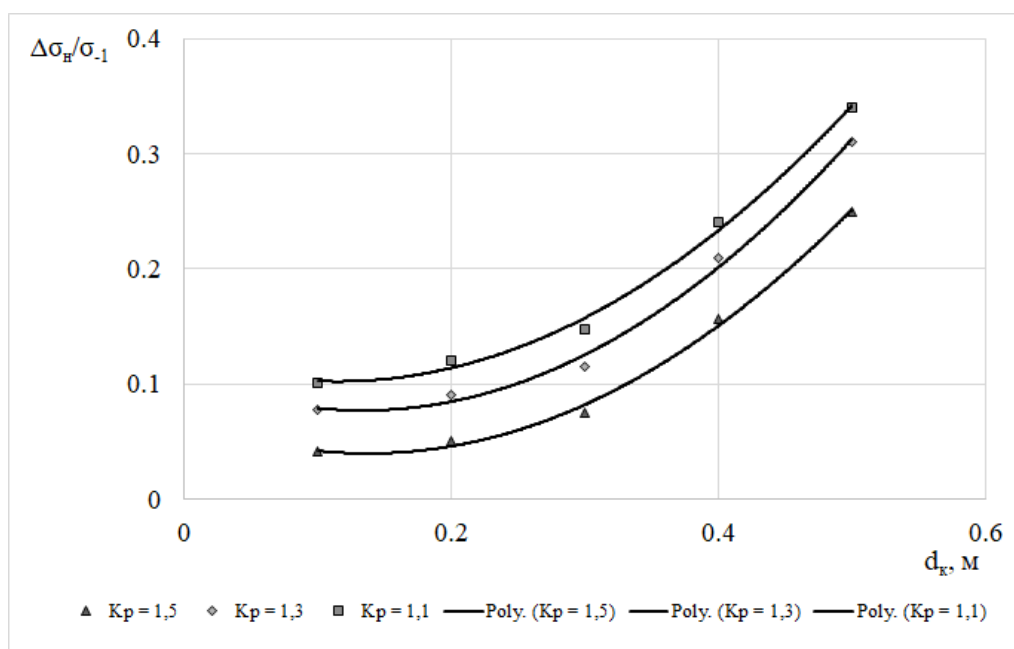


Рисунок 3.13 – Зависимость амплитуд напряжений в стреле экскаватора ЭКГ-10 от диаметра кондиционного куска и коэффициента разрыхления пород: $\Delta\sigma_n/\sigma_{-1}$ – отношение размаха номинальных напряжений к пределу усталости; d_k – средний кондиционный диаметр куска в развале

При удалении кусков породы с рабочего поля производится дополнительные операции, которые дают дополнительные циклы нагружения.

Алгоритм определения длительности роста трещины от обнаруженного размера до критического требует сведения о параметрах исследуемого конструктивного элемента, параметрах трещины и сведения трещиностойкости стали.

Наиболее важными являются данные о параметрах циклического нагружения в месте расположения трещины на время ее возможного развития до критического размера.

Фактические размеры трещины определяются при помощи различных методов: внешний осмотр, пенетрационный, рентгеновский, ультразвуковой способы и т.д. Такие исследования выполняются согласно требованиям раз в год, стараясь совместить их с каким либо стандартным ремонтом.

В соответствии с известными методами расчет продолжительности роста трещины производится по известным данным о нагрузках при эксплуатации экскаваторов. Данная оценка не как не привязана к конкретным разрезам и

забоям, поэтому вполне закономерно возникают значительные отклонения от истенных данных. Необходим более точный алгоритм, учитывающий влияние параметров конкретного забоя за длительный период.

В результате исследования по созданию такого алгоритма установлены зависимости изменения числа циклов механического нагружения и величин средних амплитуд от гранулометрического состава взорванной горной массы. Установлено, что с увеличением среднего диаметра куска в развале увеличивается относительное число циклов механического нагружения металлоконструкций экскаватора – n/V х горных пород (рисунки 3.14, 3.15).

В результате установлены зависимости изменения числа циклов механического нагружения и величин средних амплитуд от грансостава взорванных пород. Установлено, что с увеличением среднего диаметра куска в развале увеличивается относительное число циклов механического нагружения металлоконструкций экскаватора – n/V , где n – число циклов нагружения, V – объем переработанной горной массы (рисунок 3.14).

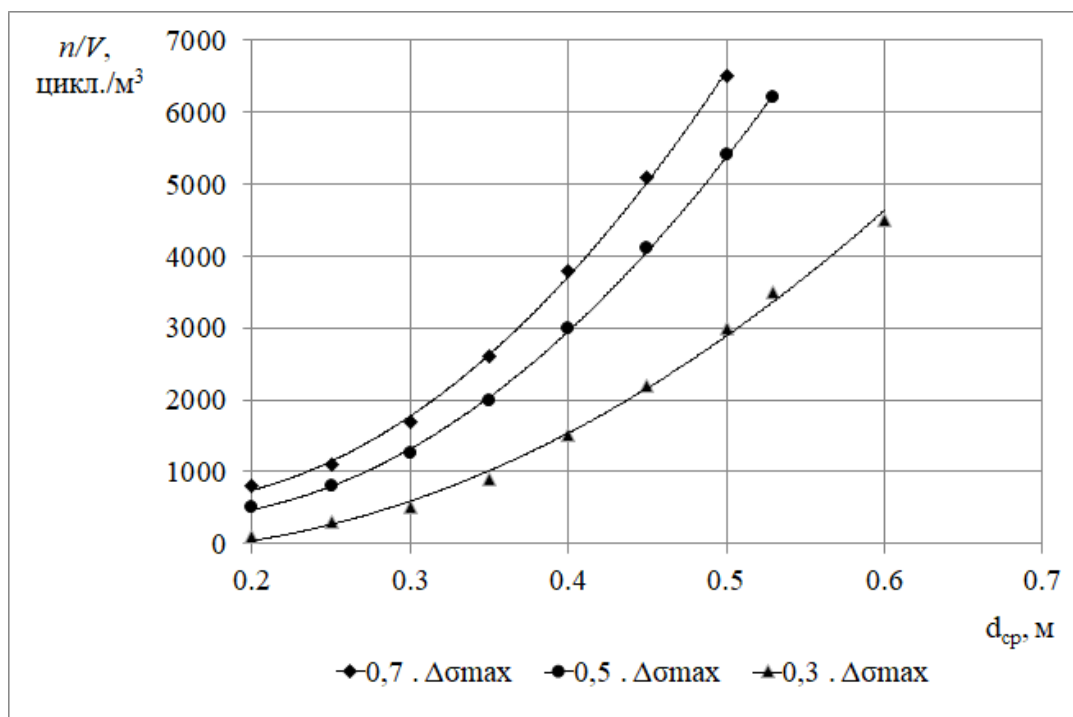


Рисунок 3.14 – Изменение относительного числа циклов механического нагружения от среднего диаметра куска развала горных пород с учетом средней относительной амплитуды в долях от максимальной: n – число циклов нагружения, V – объем переработанной горной массы

При разложении циклограмм нагружения на амплитудные уровни с увеличением среднего диаметра куска в развале от 0,2 до 0,5 происходят увеличение n/V : на уровне средней относительной амплитуды – 0,3 от уровня максимальной – 3,4 в раза; при 0,5 от максимальной – в 4,9 раз; при 0,7 от максимальной – в 5,5 раза.

Величины средних амплитуд циклов нагружения – $\Delta\sigma/\sigma_{-1}$ возрастают в зависимости от изменения d_{cp} от 0,2 м до 0,5 м в 5,5 раз (рисунок 3.15).

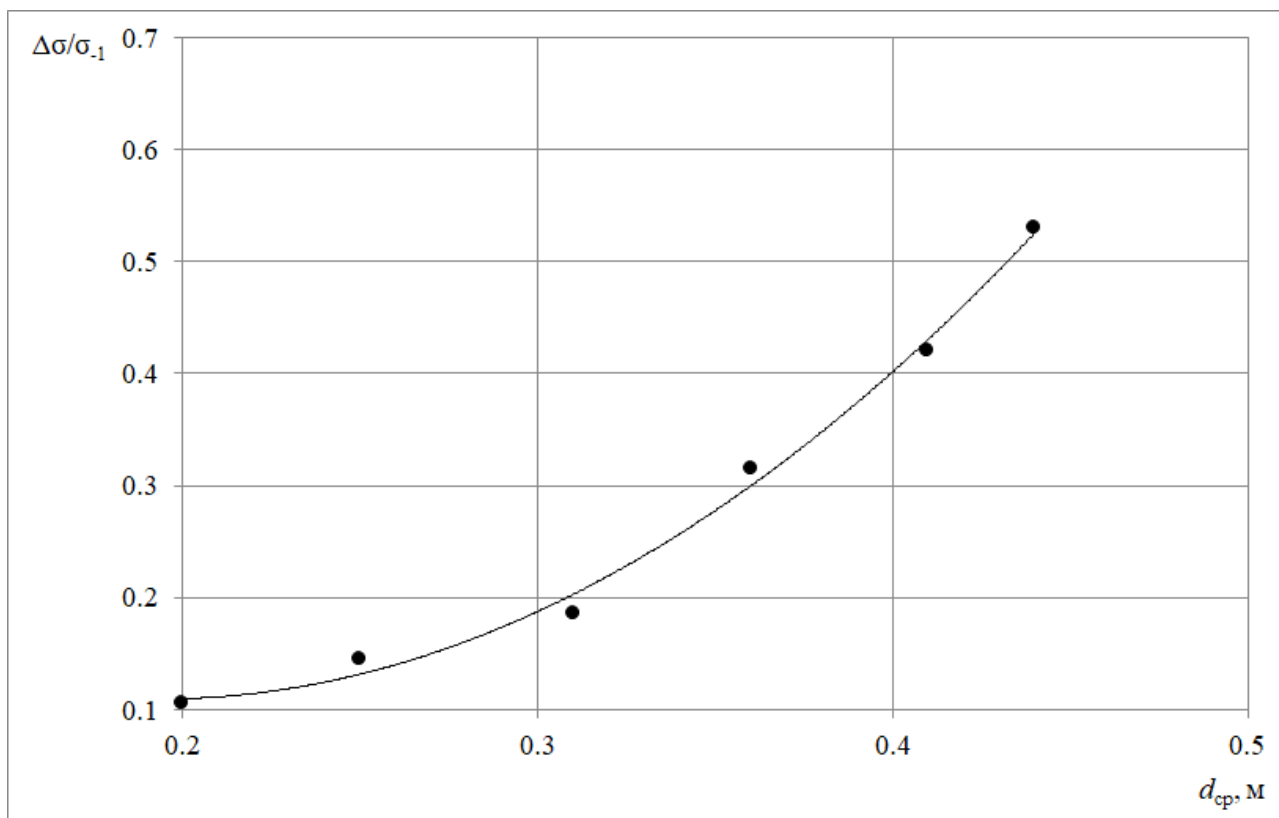


Рисунок 3.15 – Изменение величин средних амплитуд циклов нагружения в зависимости от гранулометрического состава взорванных горных пород

При разложении циклограмм нагружения на амплитудные уровни с увеличением среднего диаметра куска в развале от 0,2 до 0,5 происходят увеличение n/V : на уровне средней относительной амплитуде – 0,7 от уровня максимальной – в 5,5 раз; при 0,5 от максимальной – в 4,9 раз; при 0,3 от максимальной – в 3,4 раза.

Величины средних амплитуд циклов нагружения – $\Delta\sigma / \sigma_{-1}$ возрастают в зависимости от изменения d_{cp} с 0,2 м до 0,5 м в 5,5 раз.

В результате получены зависимости допускаемого числа циклов черпания – $N_{\text{ч}}$ для экскаватора ЭКГ-10 от среднего диаметра куска в развале – $d_{\text{ср}}$ при различной начальной длине трещины (рисунок 3.16).

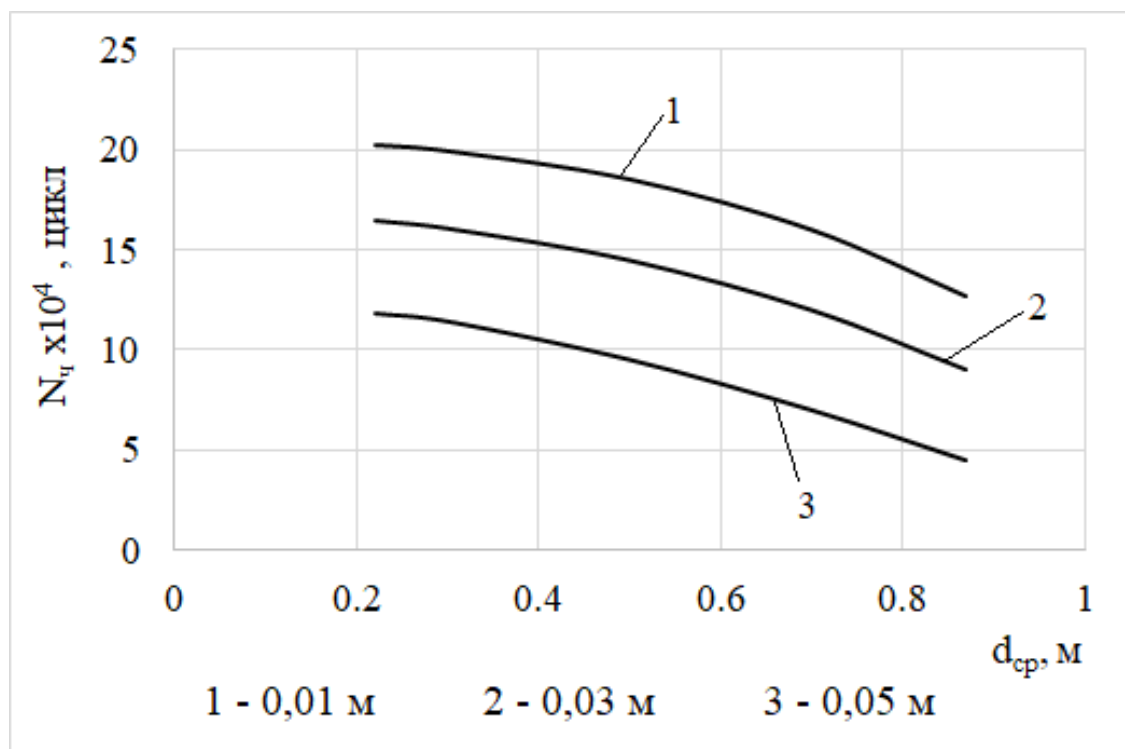


Рисунок 3.16 – Зависимость допускаемого числа циклов черпания – $N_{\text{ч}}$ для экскаватора ЭКГ-10 от среднего диаметра куска в развале – $d_{\text{ср}}$ при начальной длине трещины 0,01 - 0,05 м

Увеличение в развале пород $d_{\text{ср}}$ от 0,2 до 0,5 м вызывает ускорение развития трещин в металлоконструкциях экскаватора в 2,25 раза, при этом число циклов нагружения необходимого для подрастания стандартного начального размера до критического уменьшается в 1,33 раза.

Экспериментально были получены усилия в элементах металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10 при разработке невзорванных мелкоблочных пород. Условия, соответствующие экскавации мелкоблочных невзорванных пород: средний диаметр блока – 0,2 м и максимальный размер блока – 0,7 м (рисунок 3.17).

Установлено, что ковш экскаватора углубляется в породу без значительных перегрузок, и напор карьерных лопат работает в нормальном режиме.

В процессе наполнения ковша при разрушении блоков пород возникают мелкие скачки напряжений, при переходе от блока к блоку возникают скачки

более значительные, что объясняется вхождением в связную горную массу, в дальнейшем разрушение идет уже наполовину расколотого блока.

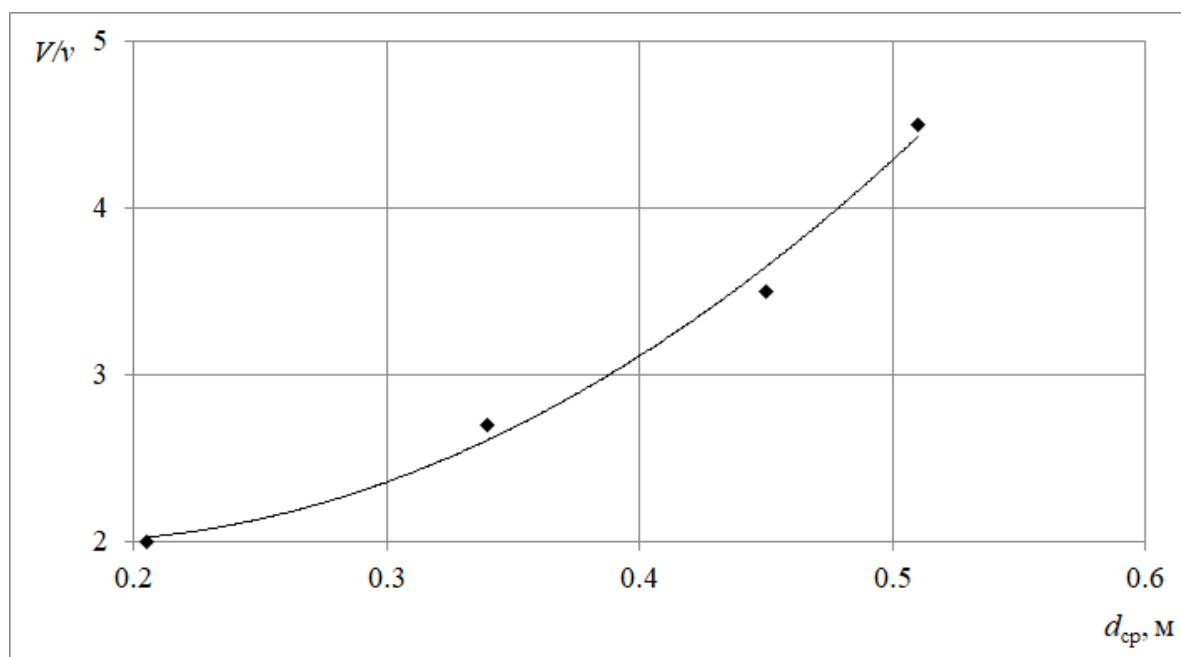


Рисунок 3.17 – Зависимость относительной скорости роста трещин у ЭКГ-10 от грансостава взорванных горных пород при сравнении со скоростью при разработке невзорванных пород

Это значительно упрощает процесс движения ковша. Величины скачков варьируются от 0,1, σ_n / σ_{-01} до 0,15 σ_n / σ_{-01} при разрушении блока породы и от 0,15, σ_n / σ_{-01} до 0,2 σ_n / σ_{-01} .

Полученные результаты исследований позволяют по параметрам забоя, по виду пород, объему использованного ВВ определять грансостав взорванных пород или по параметрам невзорванных пород получать теоретические циклограммы нагружения [8, 23, 62, 64,]. Эти циклограммы дают точное число циклов нагружения по уровням амплитуд.

Полученные циклограммы позволяют производить расчет продолжительности роста трещин, устанавливать оптимальные сроки постановки экскаваторов на ремонт и могут быть использованы при оценке долговечности несущих металлоконструкций экскаваторов.

3.3 Выводы по главе 3

1. Причиной инициации трещин в металлоконструкциях экскаваторов при экскавации взорванных пород является от столкновения рабочего органа экскаватора с некондиционными кусками породы с уровнем амплитуды более $0,6\sigma-1$.
2. При размере 0,6 ширины ковша и более куски породы являются некондиционными, дают большие размахи напряжений и должны исключаться из погрузки и перевалки.
3. Перемещение некондиционного куска с поля работы экскаватора дает дополнительные циклы нагружения числом от 2 до 12.
4. Размах относительных напряжений $\Delta\sigma H/\sigma-1$, при экскавации отдельно лежащего некондиционного куска породы меняется в пределах от 0,1 до 0,9.

ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ЭКСКАВАТОРОВ

4.1 Конечно-элементное моделирование металлоконструкций экскаваторов

Использование экспериментальных методов определения напряжений является весьма трудоемким и требующих больших финансовых затрат, применение же компьютерных методик позволяет ускорить процесс и снизить стоимость исследований. Кроме того создание моделей объектов дает возможность определять напряжения одновременно во всех местах конструкции, при любых задаваемых нагрузках.

Компьютерные программы на основе численных методов теории упругости имеют высокую точность в связи с широким применением и проверкой их на практике. Модели, создаваемые в рамках компьютерных программ, имеют хорошую наглядность и позволяют рассматривать объекты с разных сторон. С их помощью можно определять, как напряжения, так и деформации и перемещения, находить опасные точки объекта. Компьютерные программы имеют широкий спектр применения и имеют возможность выполнять расчеты по всем вариантам проектирования с учетом особенностей объектов [120, 122, 123].

В настоящее время существует большое число компьютерных программ. Расчет экскаватора ЭКГ-10 производился при помощи программы Autodesk Inventor 2016 используемой в учебных целях. Расчеты проводились общими методами, учитывая только общую схему металлоконструкций, детали прорабатывались при помощи коэффициентов концентрации напряжений.

На рисунках 4.1 – 4.6 представлены конечно-элементные модели металлоконструкций карьерного экскаватора ЭКГ-10.

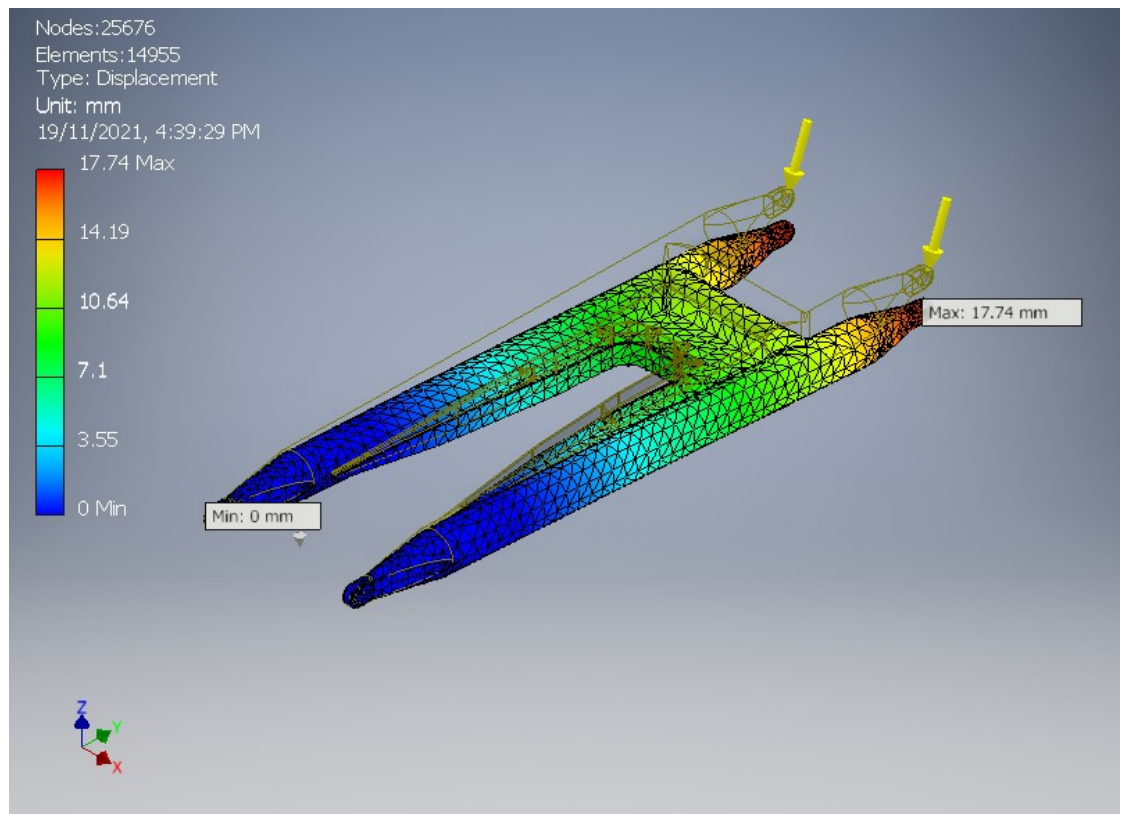


Рисунок 4.1 – Перемещение верхней стрелы

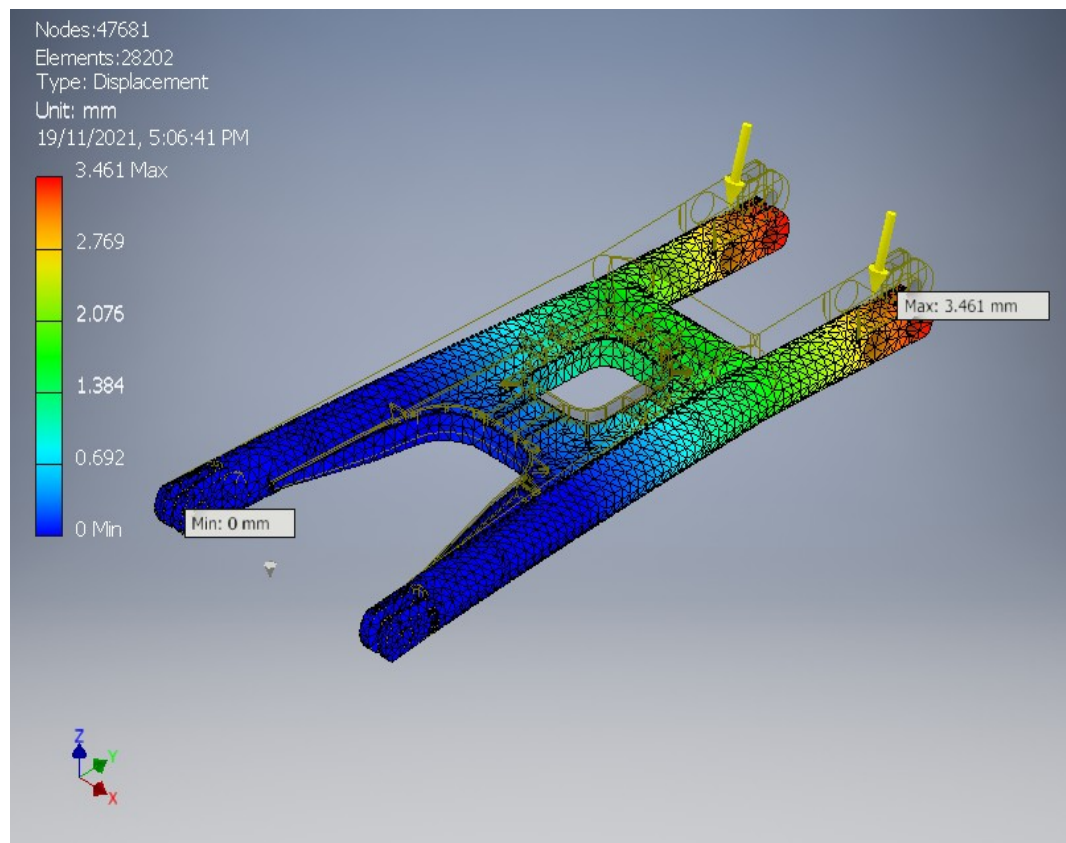


Рисунок 4.2 – Перемещение нижней стрелы

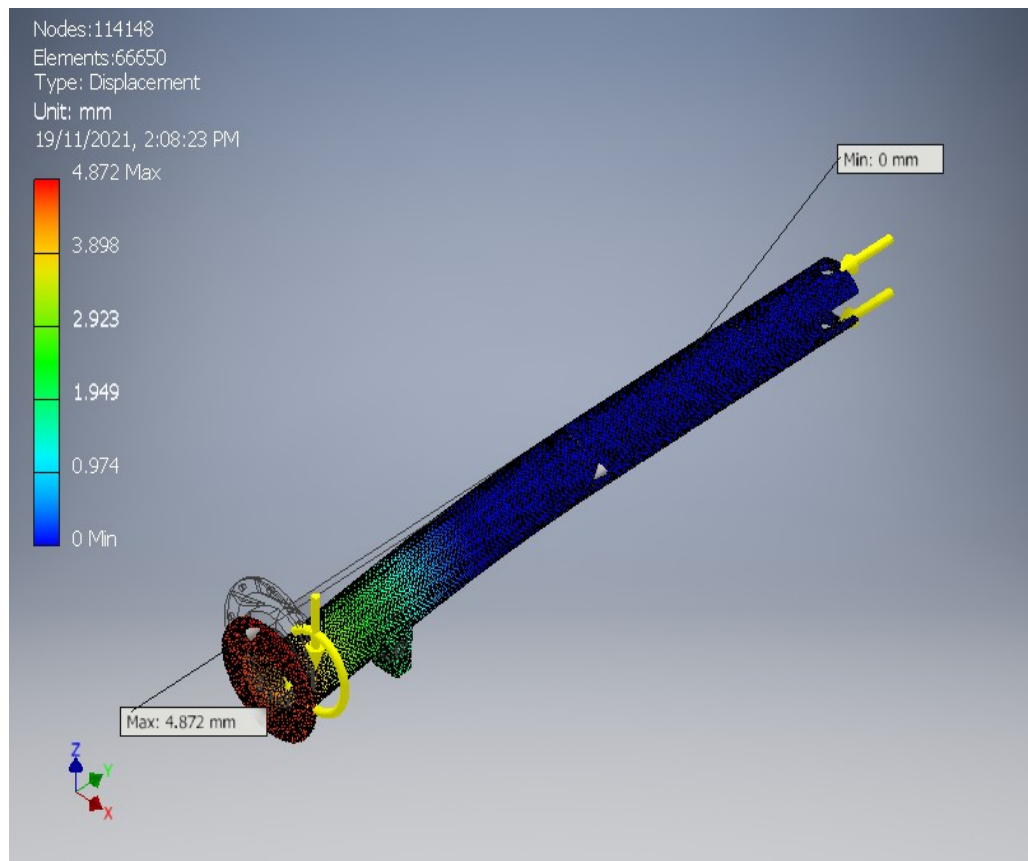


Рисунок 4.3 – Перемещение рукоятки

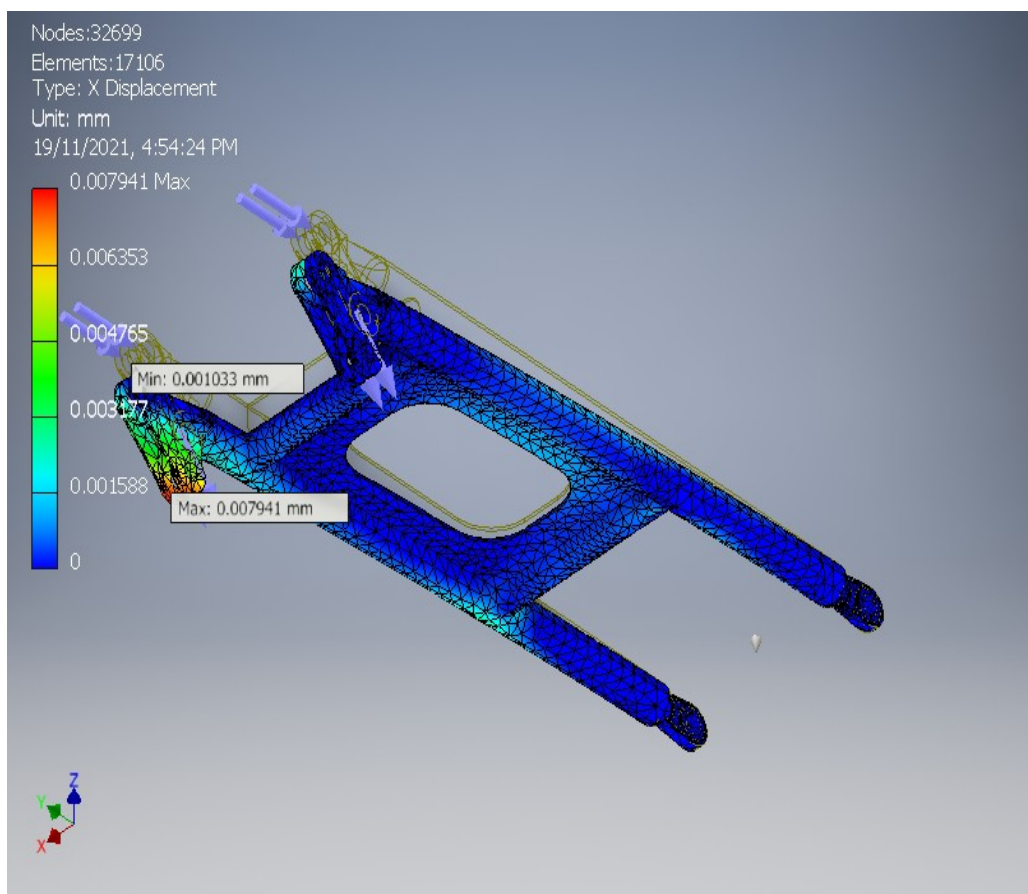


Рисунок 4.4 – Перемещение задней стойки

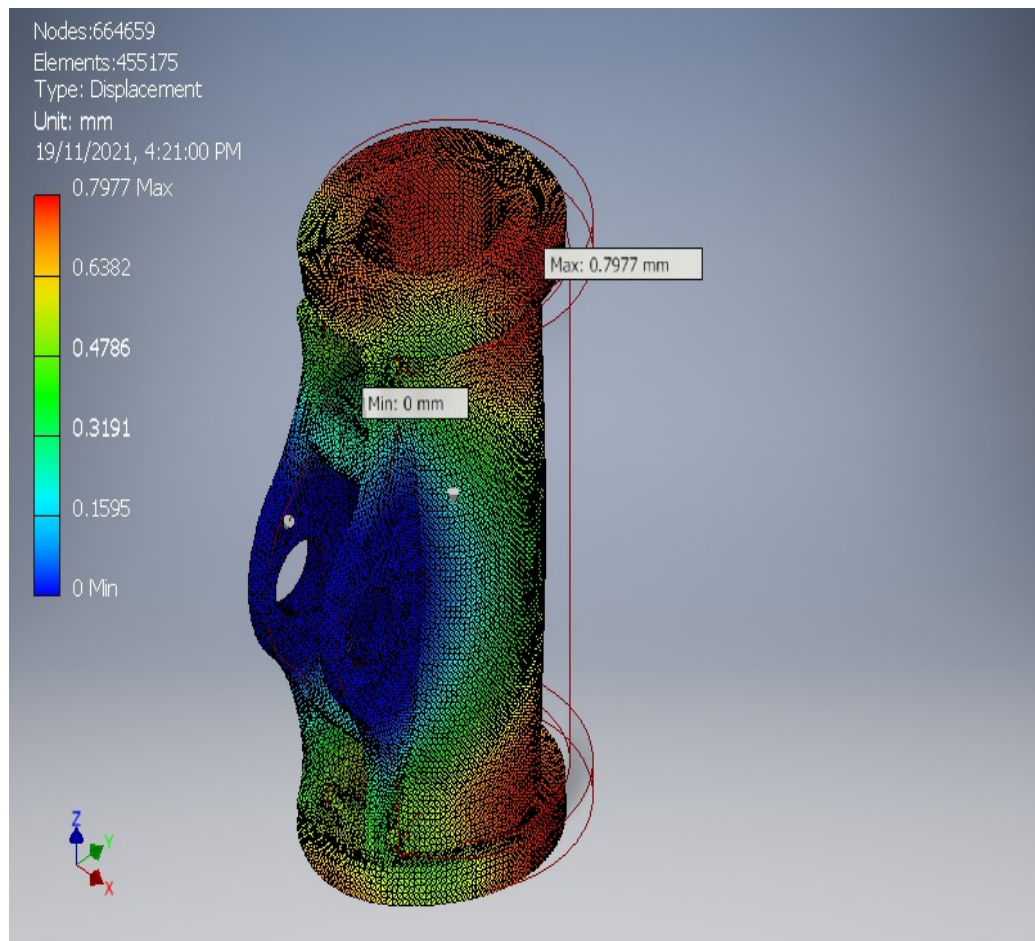


Рисунок 4.5 – Перемещение подшипника седловой

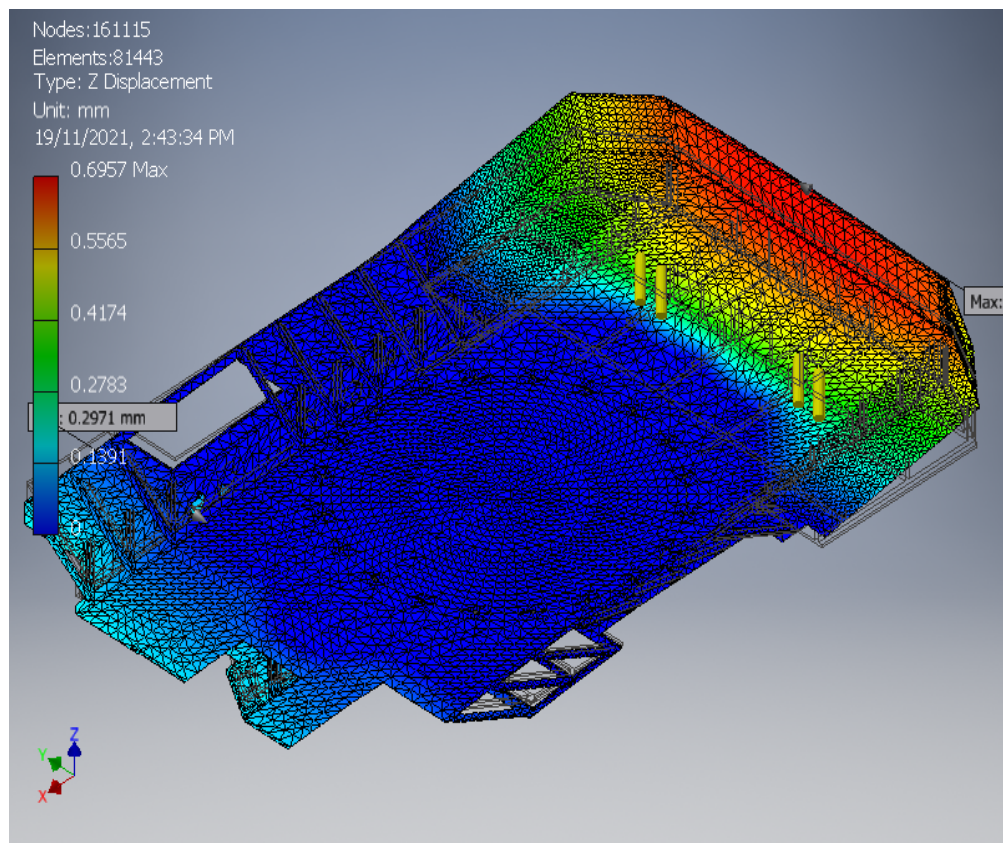


Рисунок 4.6 – Перемещение поворотной платформы

Для расчетов были выбраны конструкции наиболее подверженные трещинообразованию, ими оказались стрела и рукоять экскаватора.

Для проверки правильности созданных моделей проводились тензометрические исследования, при этом была получена неплохая сходимость.

4.2 Шнековый исполнительный орган с внутренним двигателем для ковша карьерного экскаватора

Для повышения производительности работы экскаваторов разрабатываются различные изменения конструкциях ковшей [13, 22, 66, 78].

Для работы с невзорванными горными породами был разработан шнековый исполнительный орган, который имеет внутренний двигатель и вращаясь разрушает породу и перемещает ее в ковш экскаватора. Полезная модель относится к горной промышленности, в частности, к исполнительным органам экскаваторов (ковшам) для добычи угля и других полезных ископаемых открытым способом. Такой ковш обеспечивает снижение энергопотребления при погрузке средне и мелкокусковых взорванных и не взорванных пород и угля. Снижение энергопотребления происходит за счет исключения стопорения ковша в процессе его наполнения от столкновения с плотной породной массой и сокращения числа подготовительных движений по раскладке и разворачиванию горной массы.

Устройство шнекового исполнительного органа поясняется на рисунках 4.8 – 4.9.

Шнековый исполнительный орган 1 (рисунок 4.7) размещен в передней части ковша 2 экскаватора, передняя линия шнека совпадает с линией вершин зубьев ковша. Шнек 1 выполнен в форме полого цилиндра 3 (рисунки 4.8, 4.9), внутри которого, установлен продольный вал 4, закрепляемый при помощи сменяемых подшипников в боковых стенках ковша.

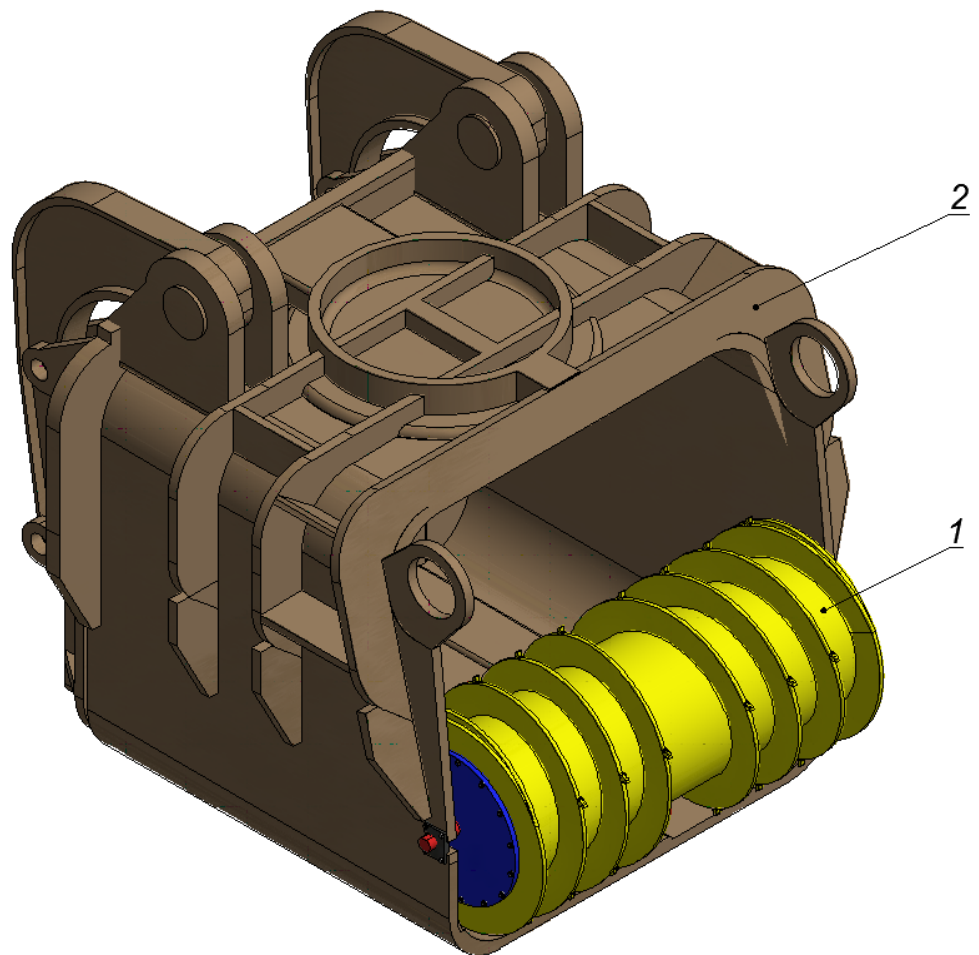


Рисунок 4.7 – Общий вид шнекового ковша экскаватора:

1 – шнековый исполнительный орган; 2 – ковш

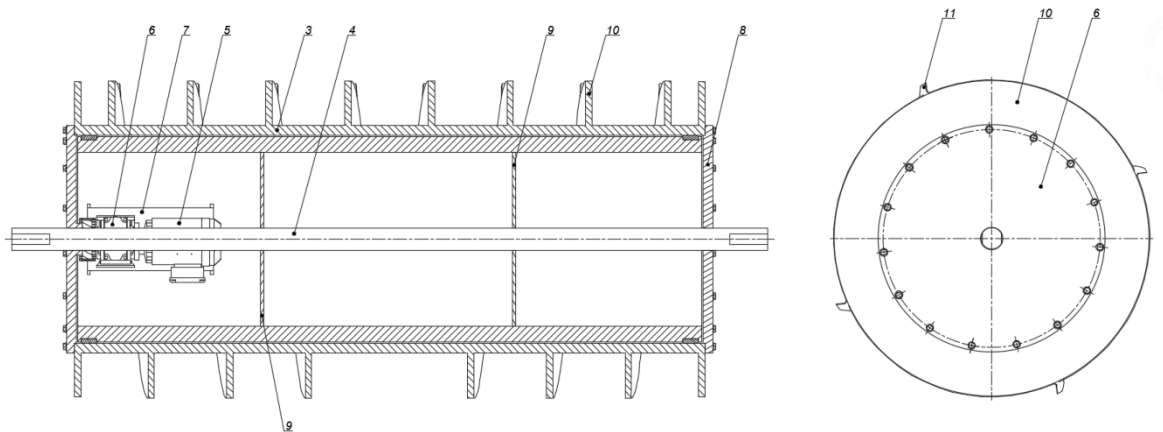


Рисунок 4.8 – Внутреннее устройство шнека: а – передний вид; б – боковой вид;

3 – цилиндр; 4 – продольный вал; 5 – электродвигатель; 6 – редуктор; 7 – площадка;
8 – защитная боковая стенка; 9 – диафрагмы жесткости; 10 – лопасти винта; 11 – зуб

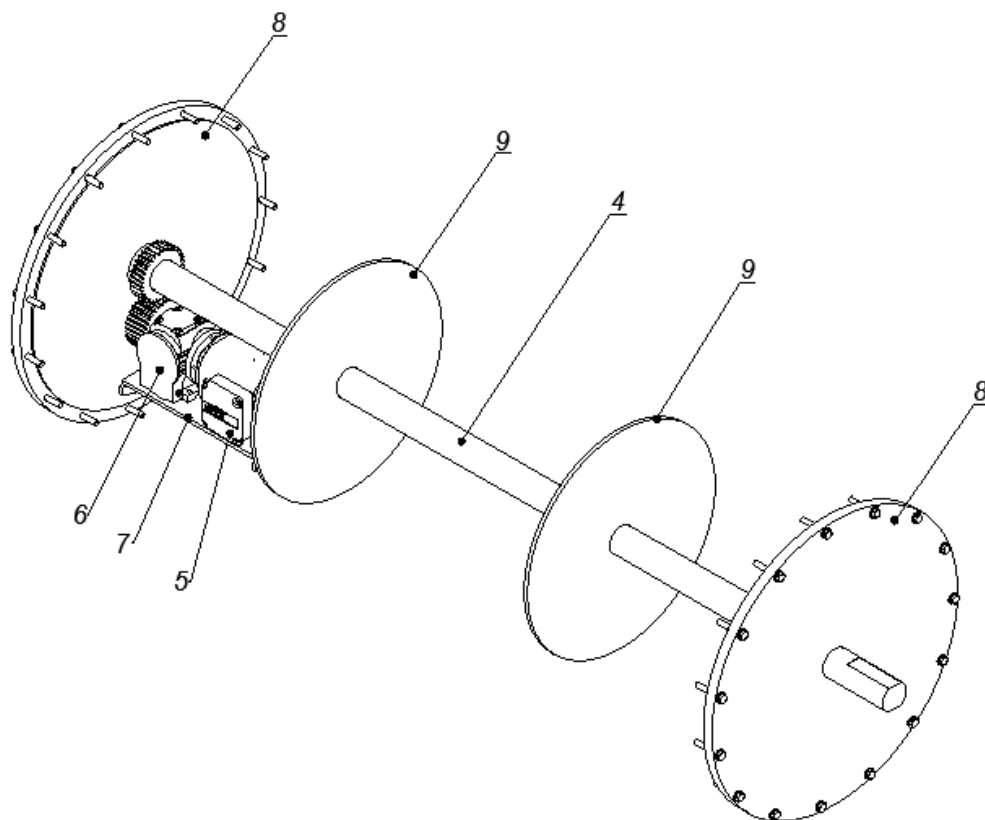


Рисунок 4.9 – Устройство подачи вращающего момента на шнек

Электродвигатель 5 с редуктором 6 установлены внутри цилиндра 3 шнека 1 и прикреплены к площадке 7, выполненной например из металла. Площадка 7 жестко закреплена к защитной боковой стенке 8. Защитные боковые стенки 8 круглой формы, установлены с двух сторон цилиндра 3 и соединены болтовым соединением с боковыми стенками ковша. Продольный вал 8 установлен горизонтально внутри цилиндра 3. Диафрагмы жесткости 9 круглой формы, в центре выполнено отверстие, в которые установлен продольный вал 4. Внешние края диафрагмы жесткости 9 жестко закреплены к внутренней стенке цилиндра 3. С наружной стороны цилиндра 3 спиралеобразно закрепляются лопасти 10 в форме спирали, при этом одна часть спирали выполнена с правым наклоном, а вторая – с левым. На лопастях 10 сверху установлены зубья 11.

Зубья на лопастях расставляются в зависимости от вида разрабатываемых пород, от средних размеров блоков. В случае разработки мелкоблочных пород через 10 см по периметру окружности лопасти, среднеблочных пород через 30 см. В соответствии с теорией д.т.н. Паначева И.А. невзорванные породы делятся на 3 категории блочности: 1-я – куски породы в массиве разделены трещинами и

имеющие размер блока в среднем 10 см; 2-я – 30 см; 3-я – 70 см. Породы 1-й и 2-й категории блочности могут разрабатываться без предварительной взрывной подготовки.

Шнек 1 работает следующим образом. В стандартном режиме ковш экскаватора 2 подается в развал или массив породы или угля. Под действием сил подачи ковша 2 и вращающего момента электродвигателя 3, движение через наружную шестерню редуктора и внутреннюю шестерню цилиндра передается к полуму цилиндру 7, диафрагмам 8 и валу 9. Цилиндр вместе с лопастями винта 10 и закрепленными на них зубьями 11, совершают в породном развале вращательно–поступательное движение, взаимодействуют с породной массой или углем, осуществляют их разрушение и одновременно перемещение в внутрь ковша.

Использование энергоэффективного шнекового устройства совместно с экскаваторным ковшом, создает условия для повышения производительности экскаватора при разработке взорванных крупноблочных, среднеблочных, мягких пород и угля.

Технико-экономическая эффективность технического решения заключается в уменьшении энергопотребления при наполнении ковша экскаватора, исключении стопорений ковша при погрузке, уменьшении скачков электронапряжения в сети и механических напряжений в металлоконструкциях экскаватора. Уменьшение размахов и частоты механических напряжений приводит к увеличению живучести и долговечности основных металлоконструкций и увеличению общего срока работы экскаватора при разработке взорванных и не взорванных горных пород.

Построенные конечно-элементные модели ковшей с рукоятями экскаватора ЭКГ-10 в двух вариантах: без шнека и со шнеком показали изменение напряженного состояния металлоконструкций экскаватора (рисунки 4.10, 4.11).

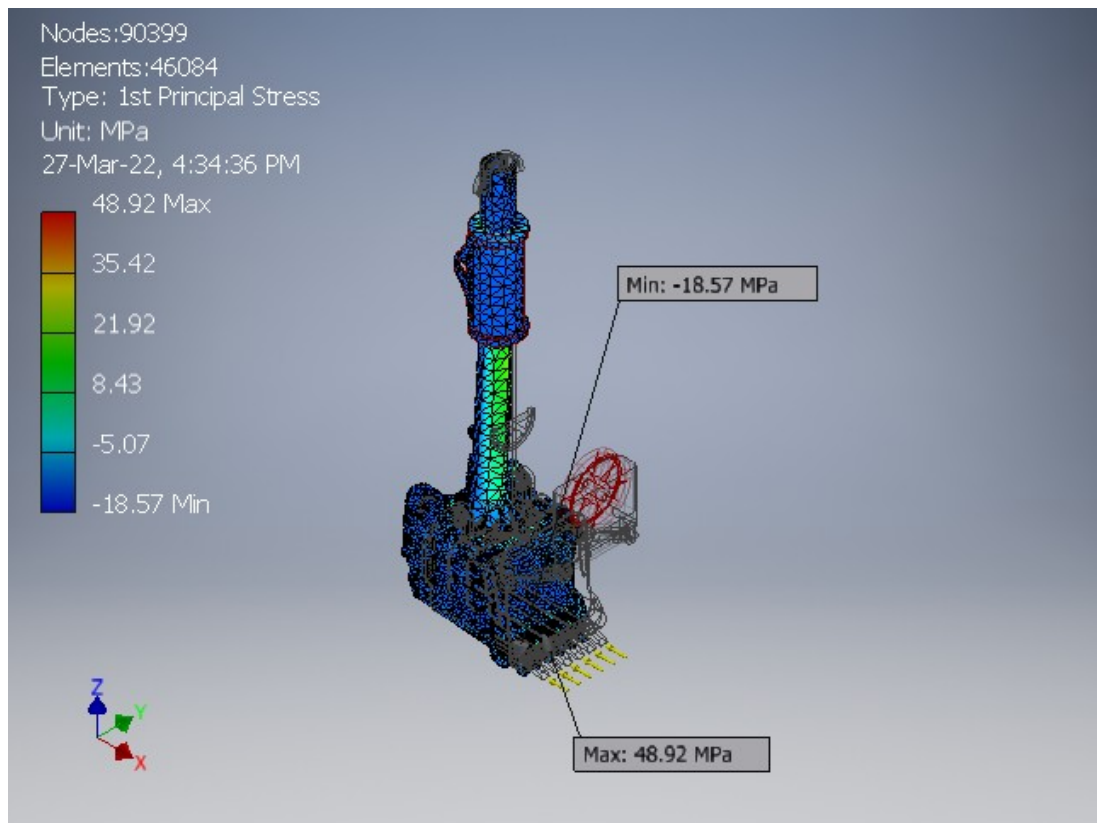


Рисунок 4.10 – Конечно-элементная модель ковша с рукоятью экскаватора ЭКГ-10 без шнека (напряженное состояние металлоконструкций экскаватора)

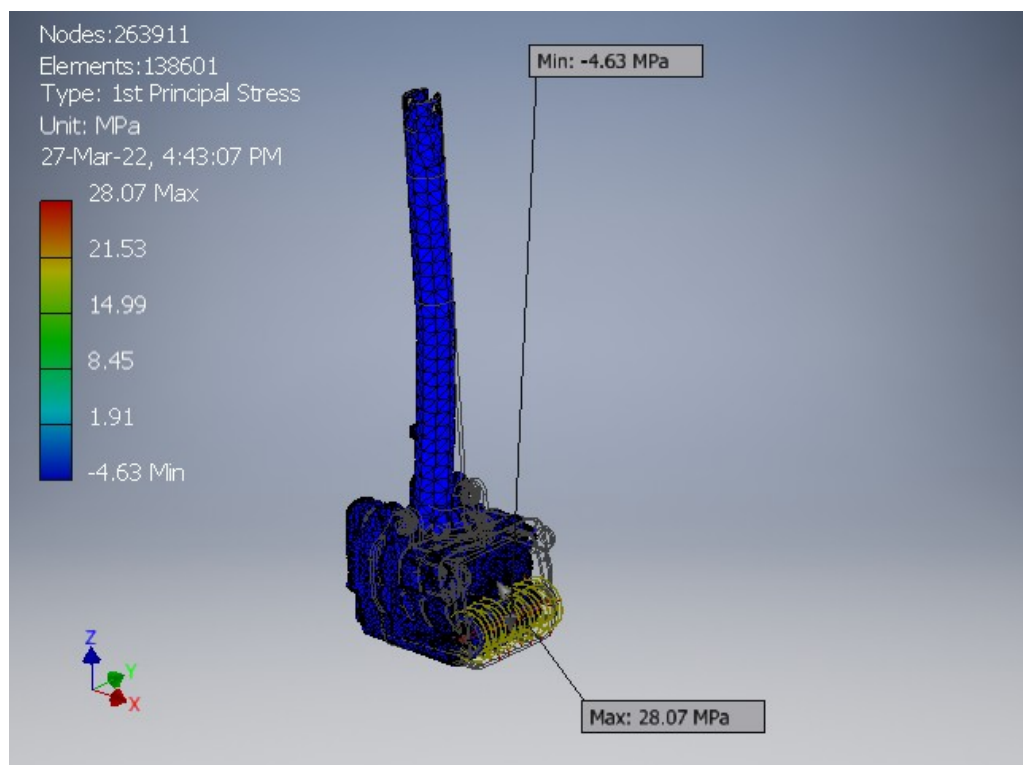


Рисунок 4.11 – Конечно-элементная модель ковша с рукоятью экскаватора ЭКГ-10 со шнеком (напряженное состояние металлоконструкций экскаватора)

Расчеты установили, что шнековый механизм, применяемый для невзвешанных мелкоблочных пород, приводит к снижению напряжений в 1,8 раза, что значительно сказывается на продолжительности работы экскаватора.

4.3 Расчет металлоконструкций экскаватора на долговечность

Используя данные о воздействиях пород на металлоконструкции при их разработке: сведения о среднем диаметре куска в развале кондиционной части развала, сведения о группах кусков по размерам, сведения о некондиционных кусках, сведения о коэффициентах разрыхления слоев развала пород составляются теоретические гистограммы нагружения.

Наличие гистограмм нагружения дает основу для расчета долговечности металлоконструкций экскаваторов при наличии трещин, время работы до критического состояния и определяет время постановки экскаватора на ремонт.

На основе экспериментальных сведений разработан алгоритм создания теоретических гистограмм нагружения экскаватора ЭКГ-10 (рисунок 4.12).

По результатам исследований получены зависимости взаимодействия ковша экскаватора с различными развалами горных пород от вертикальной и горизонтальной нагрузки. Они имеют вид распределения Вэйбола (рисунки 4.13, 4.14).

В настоящее время существует достаточно большое число методик по оценке долговечности конструкций [17, 18]

На основе проведенных теоретических экспериментальных исследований была разработана методика по оценке долговечности и прочности металлоконструкций экскаваторов типа ЭКГ-10. Время работы конструкции определяется по длительности роста трещин, через чередование блоков нагружения с различной циклической амплитудой и последовательным уменьшением и увеличением размахов напряжений (рисунки 4.15, 4.16).

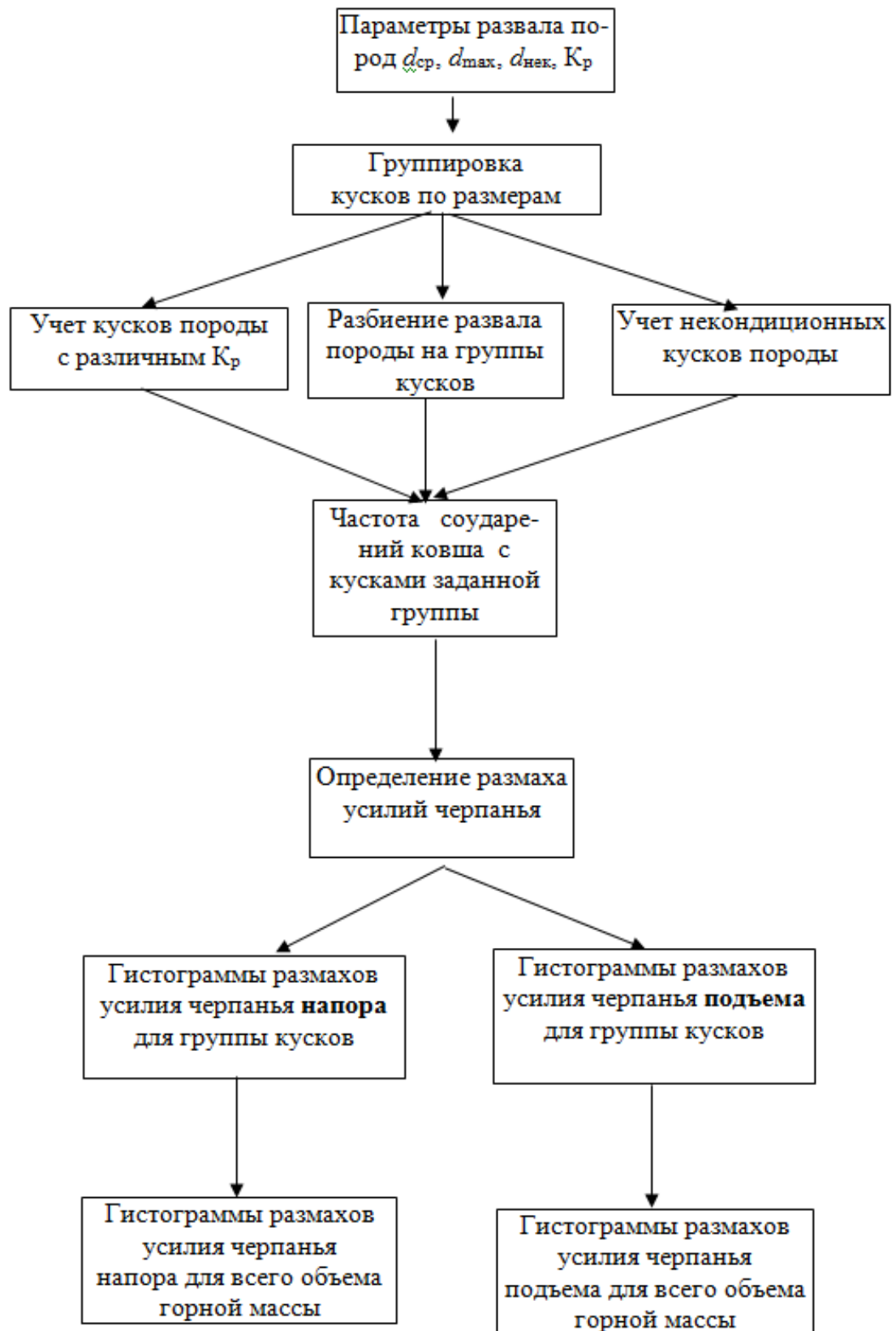


Рисунок 4.12 – Алгоритм создания теоретических гистограмм нагружения экскаватора

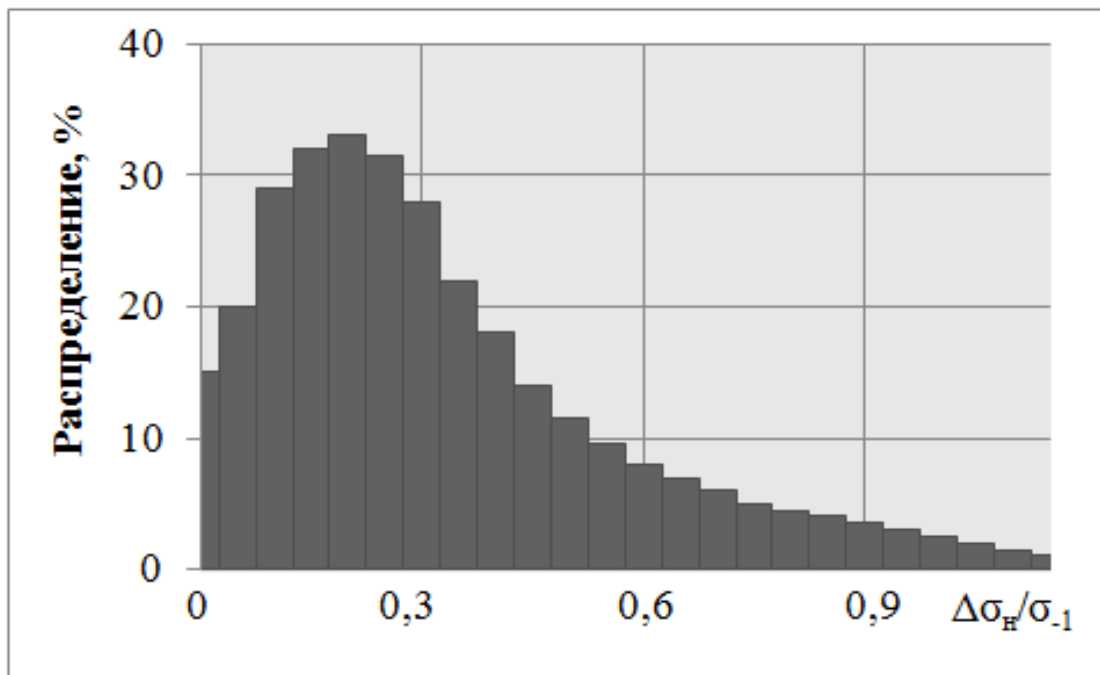


Рисунок 4.13 – Гистограмма нагружения стрелы экскаватора ЭКГ-10 в вертикальной плоскости

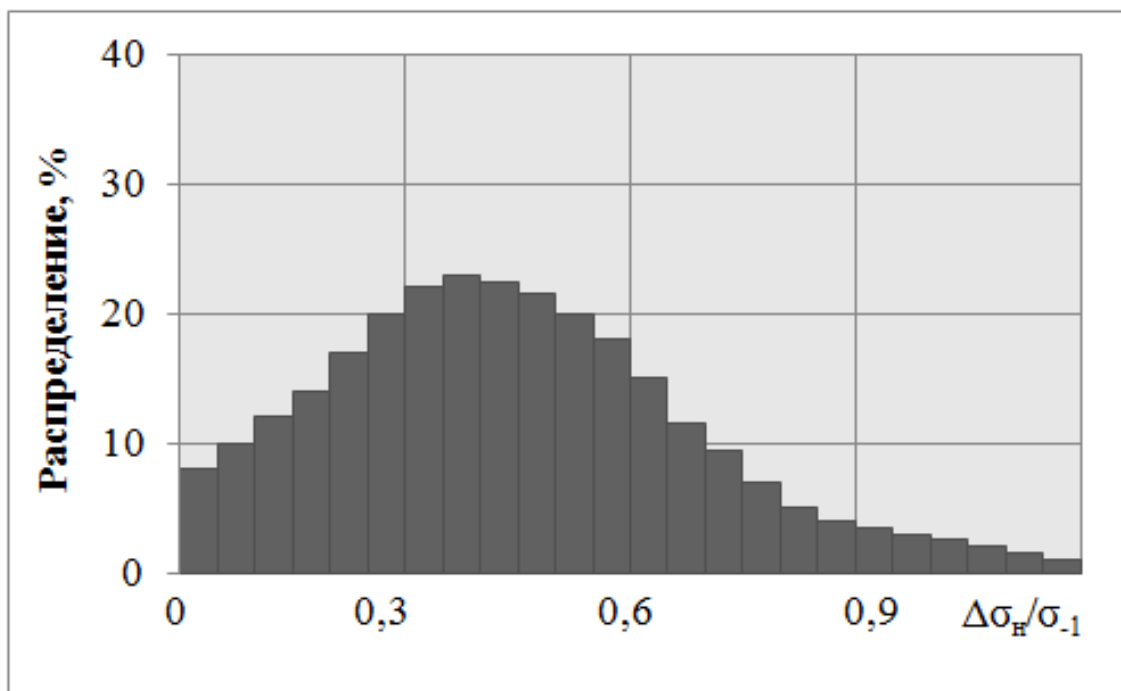


Рисунок 4.14 – Гистограмма нагружения стрелы экскаватора ЭКГ-10 в горизонтальной плоскости

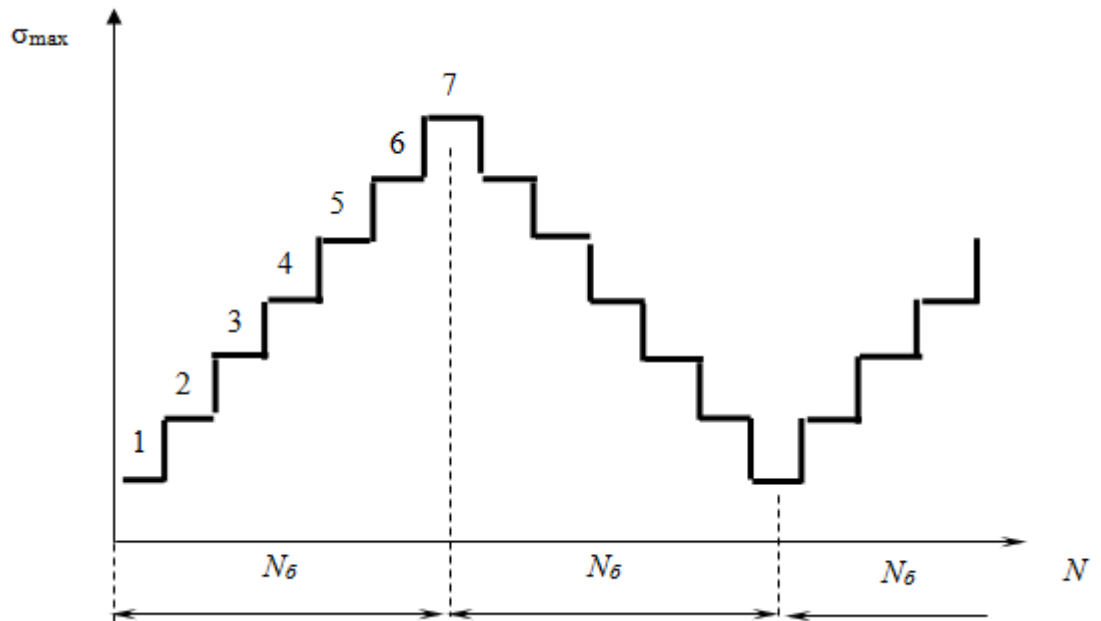


Рисунок 4.15 – Последовательность стыковки блоков нагружения в ходе расчета долговечности металлоконструкций

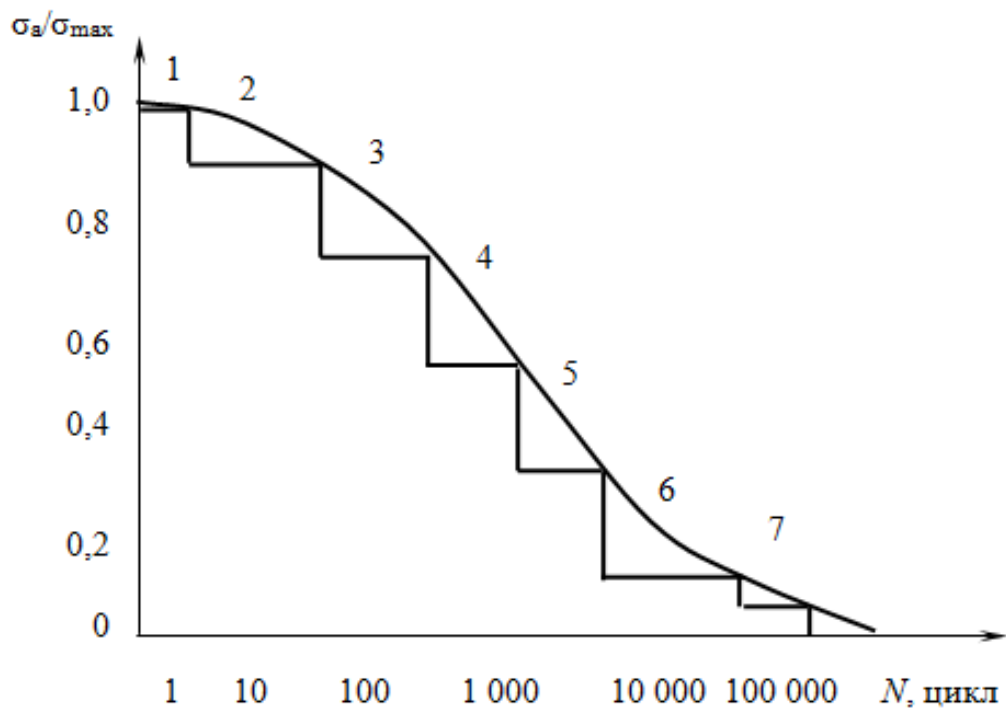


Рисунок 4.16 – Преобразование напряжений блочной системой

При оценке долговечности металлоконструкций с поверхностной трещиной ее глубина определяется (4.1):

$$a = \frac{K_c^2 \cdot Q}{\pi \cdot \gamma_{ост}^2 \cdot \sigma_{max}^2 \cdot F} \quad (4.1)$$

где a – глубина трещины, мм,

Q – параметр формы трещины,

F – коэффициент влияния растяжения на значение КИН.

Долговечность конструкции при росте поверхностной трещины определяется (4.2):

$$N = \frac{2}{(n-2) \cdot C \cdot \Delta\sigma^n \left(F^2 \cdot \frac{\pi}{Q} \right)^{\left(\frac{n}{2}\right)}} \cdot \left[\frac{1}{a_o^{\left(\frac{n-2}{2}\right)}} - \frac{1}{a_k^{\left(\frac{n-2}{2}\right)}} \right], \quad (4.2)$$

где C и n – параметры циклической трещиностойкости;

$\Delta\sigma$ – размах напряжений в зоне трещины;

a_0 и a_k – начальный и конечный размер трещины.

На основе проведенных исследований был разработан алгоритм расчета подрастания трещины от начального размера до превращения ее в сквозную в металлоконструкциях экскаваторов при циклическом нагружении (рисунок 4.17).

Критическая длина сквозной трещины определяется по формуле (4.3):

$$l_{кр} = \frac{K_C^2}{2\sigma_{max}^2 Y^2} \quad (4.3)$$

где K_C – параметр статической трещиностойкости,

σ_{max} – экстремальные напряжения в сечении,

Y – коэффициент, учитывающий форму трещины.

Размах коэффициента интенсивности напряжений (4.4):

$$\Delta K_1 = \Delta\sigma \sqrt{\pi l} Y \quad (4.4)$$

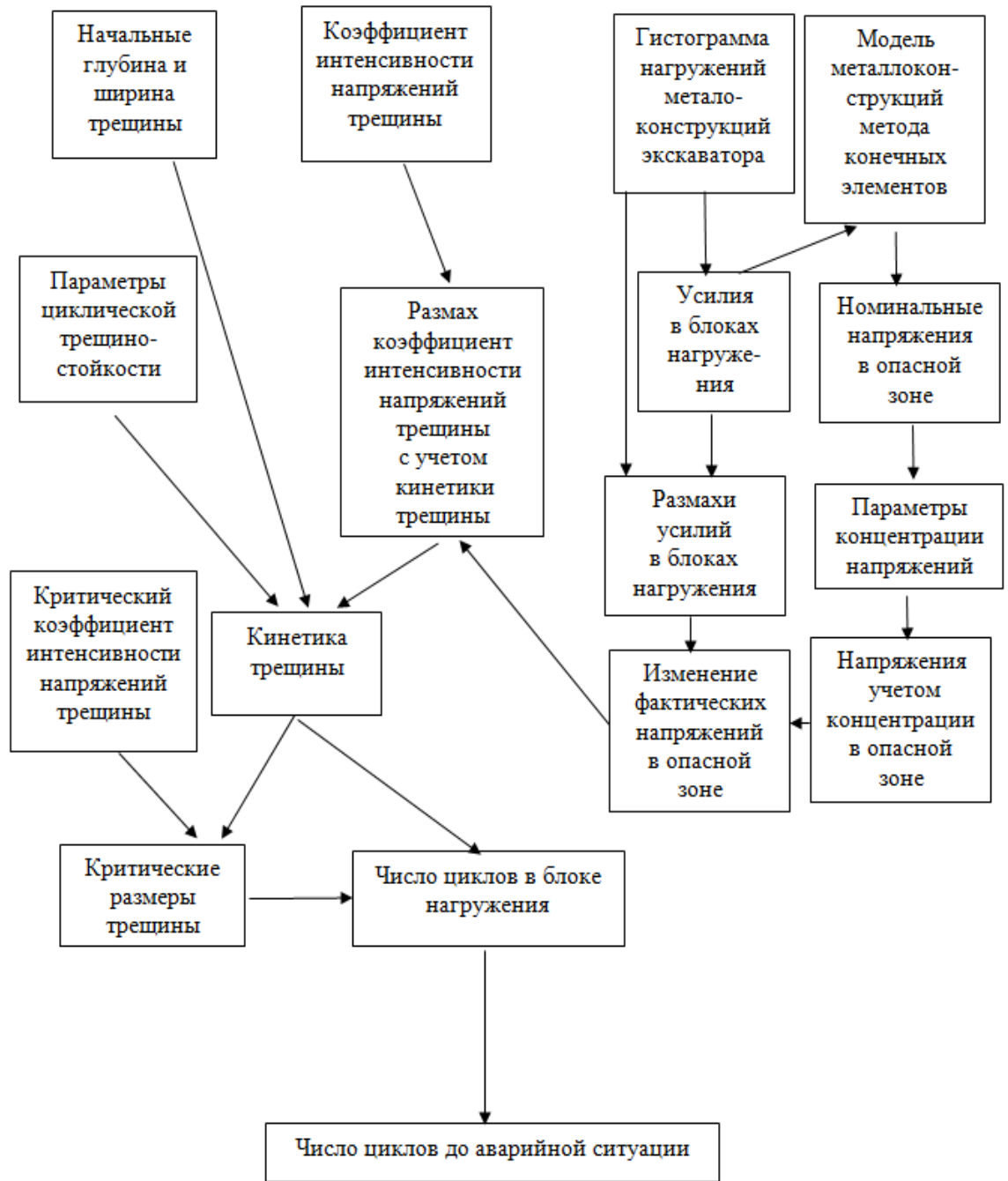


Рисунок 4.17 – Последовательность расчета подрастания трещины от начального размера до превращения в сквозную в металлоконструкциях экскаваторов при циклическом нагружении

Долговечность металлоконструкций производится уравнения Пэриса (4.5):

$$C \left(\frac{1-n}{2} \right) [\Delta K_1]^n \Delta N_i = l_{i+1}^{\left(\frac{1-n}{2} \right)} - l_i^{\left(\frac{1-n}{2} \right)} \quad (4.5)$$

Число циклов до разрушения определяется (4.6):

$$N_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^m \Delta N_i \quad (4.6)$$

где N_i – число циклов в блоке нагружения.

Для оболочечных конструкций расчет проводился при ступенчатом развитии трещины.

Длительность роста трещины до размера, приводящего к разрушению металлоконструкции, определялось из выражения (4.7):

$$\left(\frac{l}{2}\right)_j^{\left(\frac{2-n}{2}\right)} = \left(\frac{l}{2}\right)_{j-1}^{\left(\frac{2-n}{2}\right)} + \frac{(2-n)}{2} \cdot C \cdot (\Delta\sigma)^n \cdot \left(\sec \frac{\pi \cdot (l/2)_{j-1}}{2 \cdot \lambda}\right)^{n/2} \cdot \frac{2}{\pi \cdot l} \cdot \int_{-1/2}^{1/2} \frac{\sigma_y(x)}{\sigma_{н, \max}} \cdot [\sqrt{(l/2)^2 - x^2}] \cdot dx \cdot N_i, \quad (4.7)$$

где l – длина трещины, мм;

j – ступень нагружения,

N_j – число циклов в ступени нагружения.

где $\sigma_y(x)$ – распределение нормальных максимальных напряжений цикла нагружения в сечении металлоконструкции;

$\sigma_{н, \max}$ – номинальные максимальные напряжения цикла нагружения в исследуемом сечении;

x – координата точки исследуемой зоны.

Коэффициент интенсивности напряжений описывает изменение напряжений в зависимости от точки исследования в зоне развития трещиноподобного дефекта перед вершиной трещины. Он входит в формулы по расчету длительности развития трещины.

Концентрация напряжений значительно увеличивает скорость развития трещин. Концентрация напряжений вызывается резкими изменениями формы объекта, размеров, технологических проемов. Сварные швы также влияют на изменение напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в худшую сторону.

Форма объекта влияет на траекторию развитие трещины, длительность ее роста, критическое состояние. Одной из форм сечений металлоконструкций является кольцеобразное, в форме трубы, которая работает на продольные и изгибные деформации.

КИН для труб имеет иную формулу (4.8) [11, 67]:

$$K = q \cdot (\sqrt{l}) \cdot \left\{ 1 + \frac{\pi}{64} \cdot \lambda^2 \dots \right\} \quad (4.8)$$

где q – усилия в зоне дефекта,

λ – параметр размера дефекта.

При развитии трещины не перпендикулярно оси металлоконструкции КИН рассчитывается (4.9):

$$K = p \cdot (\sqrt{l}) \cdot \left[1 + \frac{\pi}{64} \cdot \lambda^2 \cdot (3 + 2 \cdot \cos 2 \cdot \gamma) \dots \right] \quad (4.9)$$

где λ – параметр размера трещины,

γ – угол, описывающий распространение дефекта.

Изгибная составляющая в месте развития дефекта коэффициент интенсивности напряжений находится (4.10):

$$K = \frac{\lambda^2}{192 \cdot h} \cdot \frac{(\sqrt{3 \cdot (1 - \nu)})}{(1 - \nu) \cdot (3 - \nu)} \cdot \{ 4 \cdot q^{**} \cdot [3 \cdot (15 - \nu) \cdot \sin^4 \gamma - (1 - 7\nu) \cdot \cos^4 \gamma] \}, \quad (4.10)$$

где q^{**} – составляющая от изгиба,

h – толщина стенки.

В результате исследований разработан алгоритм вычисления продолжительности роста поверхностных трещин от начального размера до сквозного прорастания (рисунок 4.18).

Натурные исследования показали достаточно высокое совпадение теоретических расчетов и наблюдений.

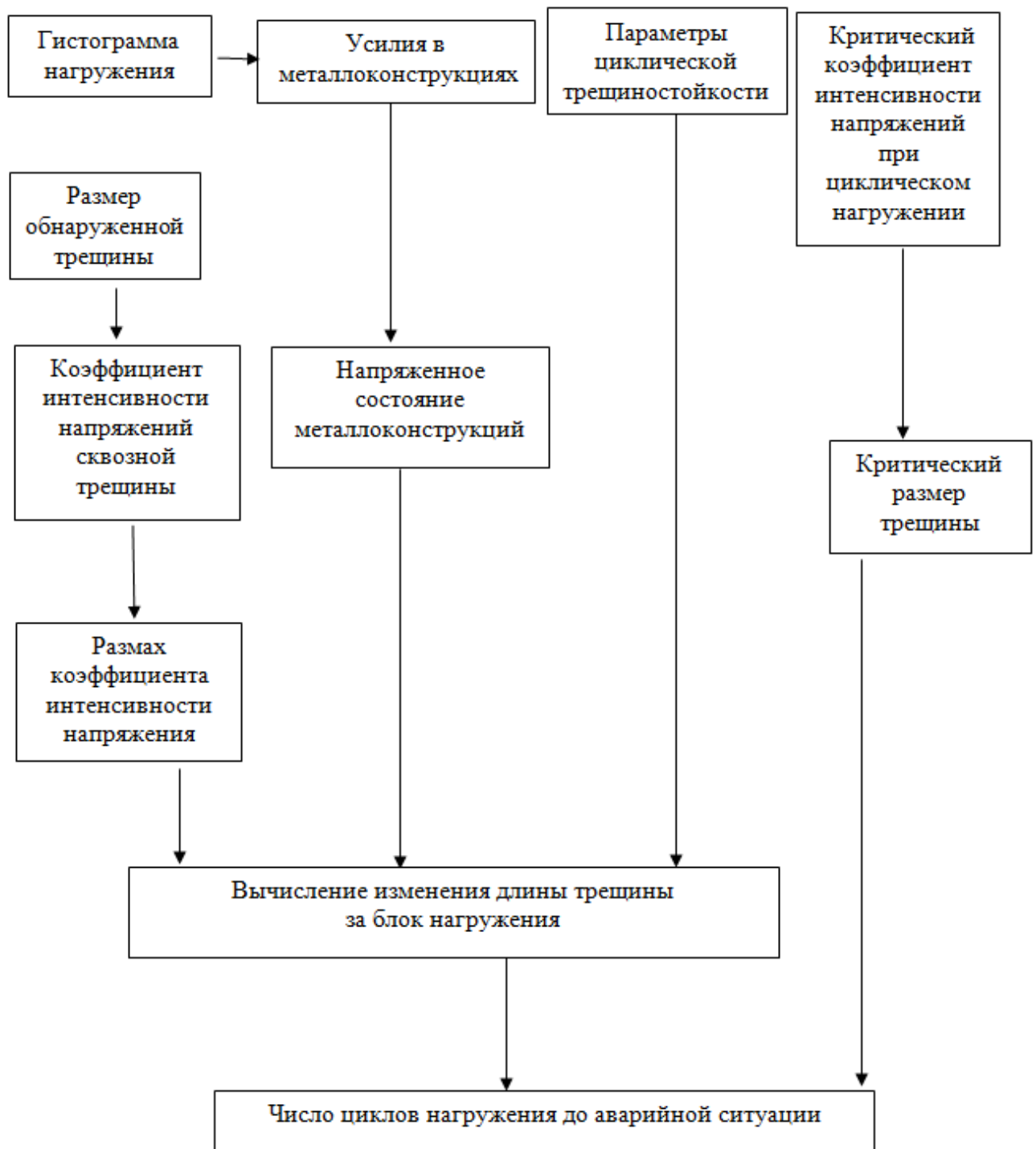


Рисунок 4.18 – Алгоритм расчета долговечности металлоконструкций экскаваторов при наличии сквозных трещин

Натурные исследования показали достаточно высокое совпадение теоретических расчетов и наблюдений.

Использование результатов исследований нагруженности экскаваторов при работе в различных забоях и разработанный алгоритм дает возможность

своевременно ставить экскаватор на ремонт и тем самым сокращать затраты при замене экскаваторов в случае аварий.

4.4 Выводы по главе 4

1. Разработанная методика позволяет предотвращать внезапные аварии металлоконструкций экскаватора от развития трещин, своевременно ставить экскаваторы на ремонт.

2. Постоянное использование методики дает возможность работать экскаваторам длительное время при наличии растущих трещин.

3. Наиболее опасными элементами металлоконструкций экскаватора, являются стрела экскаватора и двуногая стойка, на них приходится соответственно 35% и 15% отказов работы.

4. Увеличение среднего диаметра куска развала пород с 0,2 м до 0,5 м приводит к увеличению скорости роста усталостных трещин в металлоконструкциях ЭКГ-10 в 1,5 раза.

5. Снижение коэффициента разрыхления с 1,5 до 1,1 в 1,35 раза, при этом снижается в среднем в 1,33 раза число циклов нагружения до достижения трещинами их критических длин.

6. Наиболее эффективным техническим приемом предотвращения разрушений металлических конструкций экскаваторов является применение акустической эмиссии в процессе работы экскаватора, как способа постоянного контроля за возникновением и развитием трещины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - разработана методика оценки долговечности металлоконструкций экскаватора ЭКГ-10 при экскавации горных пород, обеспечивающая продления их безопасной эксплуатации на длительный период в условиях угольных разрезов Вьетнама и имеет важное народнохозяйственное значение для Социалистической Республики Вьетнам.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в нижеследующем.

1. Разработанная методика позволяет предотвращать внезапные аварии металлоконструкций экскаватора от развития трещин, своевременно ставить экскаваторы на ремонт.

2. Постоянное использование способов дает возможность работать экскаваторам длительное время при наличии растущих трещин.

3. Наиболее опасными элементами металлоконструкций экскаватора, являются стрела экскаватора и двуногая стойка, на них приходится соответственно 35% и 15% отказов работы.

4. Увеличение среднего диаметра куса развала пород с 0,2 м до 0,5 м приводит к увеличению скорости роста усталостных трещин в металлоконструкциях ЭКГ-10 в 1,5 раза.

5. Снижение коэффициента разрыхления с 1,5 до 1,1 в 1,35 раза, при этом снижается в среднем в 1,33 раза число циклов нагружения до достижения трещинами их критических длин.

6. Разработка невзорванных пород с размерами блоков от 0,1 м до 0,5 м приводит к увеличению средней амплитуды цикла нагружения в 2,2 раза и увеличению скорости роста трещины в 1,8 раза и описывается линейной зависимостью.

7. Основным фактором, влияющим на трещинообразование в металлоконструкциях экскаваторов, является наличие случайных перегрузок,

возникающих вследствие столкновения ковша с некондиционными кусками породы (55%), слоями разрушенных пород с низким коэффициентом разрыхления (25%), не взорванными естественными отдельностями (20%).

8. При переходе от мелкоблочных невзорванных пород к среднеблочным скорость роста трещин в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-10 увеличивается скачкообразно в 1,4 раза и в дальнейшем возрастает в зависимости от среднего диаметра куска в развале пород.

9. Использование методики позволяет продлевать срок их безаварийной работы в среднем в 1,4 раза.

10. Разработанная методика оценки долговечности металлоконструкций экскаваторов апробированы в Институте Энергетического и Горного Машиностроения при реализации научных проектов для оценки долговечности экскаваторов на ряде угольных разрезов Вьетнама с учетом принимаемых решений с целью постановки на ремонт и дальнейшей их эксплуатации, а также в учебном процессе Промышленного университета Куангниня.

Перспективами развития темы диссертации в будущем является расширение исследований в отношении других марок экскаваторов, работающих на разрезах Вьетнама. В этом плане наиболее важными для изучения могут стать экскаваторы устаревших типов и имеющие большой срок эксплуатации: ЭКГ-5А, ЭКГ-8И. Продление их эксплуатации может дать значительный экономический эффект. Также имеет перспективы развитие направления об оценке остаточного ресурса металлоконструкций экскаваторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева, Л.И. Методический подход к оценке состояния горной техники и целесообразного срока ее эксплуатации / Л.И. Андреева // Горное оборудование и электромеханика. - 2021. - №6. - С. 38-43.
2. Андреева, Л.И. Выбор стратегии ремонтного обслуживания горной техники / Л.И. Андреева // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2021. - № 4. - С. 83-91.
3. Батугин, С.А. Гранулометрия геоматериалов. / С.А. Батугин, А.В. Бирюков, Р.М. Кылатчанов // Новосибирск: Наука. - 1989. - 172 с.
4. Беляков, Ю.И. Определение сопротивлений грунтов резанию роторными экскаваторами. / Труды горно–геологического института УФАН. - 1959. - вып. 34.
5. Беляков, Ю.И. Совершенствование экскаваторных работ на карьерах./ Ю.И. Беляков, В.И. Владимиров //Москва: Недра. - 1974. - 303 с.
6. Беляков, Ю.И. Выгрузочно–погрузочные работы на карьерах. / Москва: Недра. - 1987. - 268 с.
7. Бирюков, А.В. Статистические модели в процессе горного производства. / А.В. Бирюков, В.И. Кузнецов, А.С. Ташкинов // Кемерово. Кузбассвуиздат. - 1996. - 228 с.
8. Бирюков, А.В. Об энергии взрыва./ А.В. Бирюков, И.А. Паначев, М.Ю. Насонов // Вестн. Кузбас. Гос. техн. ун–та. - 1999. - № 2. - С. 8–9.
9. Болотин, В.В. Ресурс машиностроительных конструкций./ М. Машиностроение. - 1990. - 650 с.
10. Браун, У. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / М.: Мир. - 1972. - 247 с.
11. Брок, Д. Основы механики разрушения. / Пер. с англ. М. Высш. школа. 1980. 368 с
12. Бубновский, Б.И. Ремонт шагающих экскаваторов: Справочник./ Б.И Бубновский, В.Н. Ефимов, В.И. Морозов // М: Недра. - 1991. - 347 с.

13. Бурый, Г.Г. Сравнение процесса копания стандартным ковшом экскаватора и ковшом новой конструкции / Г.Г. Бурый, И.К. Потеряев, С.Б. Скобелев, В.Ф. Ковалевский // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №1. - С. 37-44.
14. Васильев, Л.В., Малинин СИ. Влияние основных геологических факторов на поведение пород в горных выработках./ Л.В. Васильев, С И . Малинин // М.: Госгортехиздат. 1960. 96 с.
15. Великанов, В.С. Инструменты предиктивной аналитики в минимизации отказов горнотранспортного оборудования / В.С. Великанов, О.С. Мусонов, О.Р. Панфилова, Е.А. Ильина, Н.В. Дёрина // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2021. - Т.19. - №4. - С. 5–15. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-4-5-15>
16. Винокуров, В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений. /В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. //М.: Машиностроение, 1984, 280 с.
17. Волков, Д.П. Исследование экскаваторов в эксплуатационных условиях / Д.П. Волков, А.В Раннев. // Труды ВНИИСтройдормаш. - 1953. - сборник 8.
18. Волохов, Г.М. Использование моделей теории катастроф для исследования остаточного ресурса металлоконструкций./ Безопасность труда в промышленности. - 2004. - №11. - С. 47-51.
19. Временная классификация горных пород по степени трещиноватости в массиве. – М.: ИГД им. Скочинского, 1968. – 17 с. (Информационный выпуск № В-199)..
20. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах. М.: ИГД им. А.А. Скочинского. - 1976. - 48 с.
21. Вылегжанин, В.Н. Структурные модели горного массива в механике геомеханических процессов. / В.Н. Вылегжанин, П.В. Егоров, В.И. Мурашев // Новосибирск: Наука, 1990. 290 с.
22. Габов, В.В. Схема расстановки резов на шнековых исполнительных органах с подрезными, парными и групповыми срезами / В.В. Габов, В.С. Нгуен,

- Д.А. Задков, И.Д. Ключник, **До Дык Чонг** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 12 (специальный выпуск 42) – 16 с.
23. Гаевская, К.С. Статистическое исследование нагрузок на рабочее оборудование и механизмы карьерного экскаватора./ Сборник трудов МИСИ. 1960. № 31.
 24. Геология СССР. Том XIV, Кн. 1. М.: Недра, 1982. 446 с.
 25. Герике, П.Б. Формирование единого диагностического критерия для оценки технического состояния горного оборудования / П.Б. Герике, Б.Л. Герике // Горное оборудование и электромеханика. - 2021. - №2. - С. 17-22.
 26. **До, Дык Чонг**. Вопрос списания экскаваторов после истечения нормативного срока эксплуатации // Сборник международной научно-практической конференции «Научно-практические исследования», Москва. – 2020. – С. 25-28.
 27. Докукин, А.В. Повышение прочности и долговечности горных машин. /А.В. Докукин, П.В. Семенч, Е.Е. Гольдбук, Ю.А. Зислин. // М.: Машиностроение. 1982. 224 с.
 28. Доронин, С В . Исследование и совершенствование методов проектных расчетов несущих конструкций экскаваторов. / С В . Доронин, Т.А. Герасимова // Горное оборудование и электромеханика. - 2005. - № 3. - С. 22-26.
 29. Доронин, С В. Особенности напряженно-деформированного состояния несущих конструкций карьерных экскаваторов./ СВ. Доронин, В.И. Точилин // Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 13-15.
 30. Дрыгин, М.Ю. Анализ систем технического обслуживания и ремонта горного оборудования / М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №2. - С. 35-43.
 31. Дрыгин, М.Ю. Оценка влияния аварийности и системы ТОиР на безопасность оборудования угольных карьеров Кузбасса / М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №4. - С. 26-35.

32. Дрыгин, М.Ю. Оценка динамики состава и износа экскаваторного парка угольных карьеров Кузбасса / М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №6. - С. 10-18.
33. Дрыгин, М.Ю. Оценка уровня организации и эффективности применения системы планово-предупредительных ремонтов для экскаваторного парка Кузбасса / М.Ю. Дрыгин, Н.П. Курышкин // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №4. - С. 16-25.
34. Дрыгин, М.Ю. Пути повышения производительности экскаваторного парка Кузбасса / М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. - 2021. - №1. - С. 9-17.
35. Дрыгин, М.Ю. Разработка алгоритма технического диагностирования основного горного оборудования / М.Ю. Дрыгин // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №2. - С. 44-50.
36. Егоров, П.В., Колпаков Л.А., Бабенко А.В. Исследование деформируемых твердых тел зернистой структуры методом регистрации импульсного электромагнитного излучения. / П.В. Егоров, Л.А. Колпаков, А.В. Бабенко // Кемерово: Издательство Кузбасского государственного технического университета. 2003. 134 с.
37. Ермолаев, И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества. /И.Н. Ермолаев, Ю.А. Останин //М.: Высш. шк., 1988, 365 с.
38. Журков, С.Н. Физические основы прогнозирования механического разрушения. / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, В.А. Петров // Докл. АН СССР, 1981, т. 259, № 6, С. 1350–1353.
39. Злочевский, А.В. Определение коэффициента интенсивности напряжений тензометрическим методом. / А.В. Злочевский, Л.А. Бондарович, А.Н. Шувалов. // ФХММ, № 6, 1979, с. 44-47.
40. Ильницкая, Е.И. Свойства горных пород и методы их определения. / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш // М.: Недра, 1969. 392 с.

41. Казак, С.А. Остаточный усталостный ресурс элементов грузоподъемных кранов. / С.А. Казак, В.Е. Дусье, Л.В. Стоцкая. //Безопасность труда в промышленности. 1997, № 10, С. 17–18.
42. Кандауров, И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. / Л.: Издательство литературы по строительству. 1966. 319 с.
43. Карташов, Ю.М. Прочность и деформируемость горных пород. / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев. // М.: Недра, 1980. 431с.
44. Катанов, Б.А. Надежность горных машин и оборудования. / Кемерово. - 2001. - 51 с.
45. Колесник, Н.П. Расчеты строительных кранов. (Расчет механизма передвижения). / Киев, 1985, 239 с.
46. Колинз, Д.Ш. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. – М., Мир, 1984.
47. Комиссаров, А.П. Особенности режимов нагружения канатов подъемного и напорного механизмов карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, С.А. Хорошавин, К.Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №5. - С. 22-27.
48. Комиссаров, А.П. Оценка режимных параметров главных механизмов экскаватора «ГОРНЫЙ» / А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, В.С. Шестаков, О.А. Лукашук // Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №3. - С. 3-8.
49. Комиссаров, А.П. Программное управление процессом экскавации горных пород карьерным экскаватором / А.П. Комиссаров, Ю.А. Лагунова, О.А. Лукашук, В.С. Шестаков // Горное оборудование и электромеханика. - 2020. - №5. - С. 28-33.
50. Косолапов, А.В. Комплексная оценка технического уровня механического оборудования карьеров / А.В. Косолапов, А.Ю. Воронов, В.Г. Ромашко, А.Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №4. - С. 26-33.

51. Котельников, В.С. Концепция оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов, отработавших нормативный срок службы. / В.С. Котельников, Ю.А. Еремин, А.А. Зарецкий, А.А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. 2000. №10. С. 41–44.
52. Котляревский, В.А. Расчет конструкций на динамические воздействия. /В.А. Котляревский, В.И. Морозов, А.А. Петров. //В кн. Металлические конструкции. Справочник проектировщика, том 2. Изд. 3. М., АСВ, 1998.
53. Кох, П.И. Надежность механического оборудования карьеров. /М.: Недра. - 1978. - 348 с
54. Кох, П.И. Ремонт экскаваторов./М.: Недра. 1979. 281 с.
55. Крицкий, Д. Ю. Организация мониторинга стрел экскаваторов-драглайнов в режиме эксплуатации / Крицкий Д. Ю., Мутыгуллин А. В., Шигин А. О., Бардаков В. В. // Горный журнал. 2018. № 2. С. 91-96. DOI: 10.17580/gzh.2018.02.13.
56. Кузнецов, В.И. Управление горными работами на разрезах Кузбасса. Кемерово. Кузбассвуиздат. 1997. 164 с.
57. Кудрявцев, В.П. Статистическая схематизация внешних возмущений в копающих механизмах экскаваторов. / В.П. Кудрявцев, Л.А. Ишкова, А.П. Морозов, С.Н. Скобцев, В.П. Александров // Горный журнал–Известие Вузов. 1984. № 9. С. 83–87.
58. Курганов, В. М. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере / В. М. Курганов, М. В. Грязнов, С. В. Колобанов // Записки Горного института. - 2020. Том 241. С. 10. DOI: 10.31897/rmi.2020.1.10.
59. Кутузов, Б.Н. Рубцов В.К. Физика взрывного разрушения горных пород. / М.: Недра, 1976. С. 200-204.
60. Летнев, К.Ю. Энергоемкость процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием типа прямая лопата карьерного экскаватора / К.Ю. Летнев // Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №3. - С. 9-13.

61. Лукашук, О.А. Закономерности формирования режимных параметров главных механизмов карьерного экскаватора в процессе экскавации горных пород / О.А. Лукашук // Горное оборудование и электромеханика. - 2019. - №3. - С. 14-17.
62. Лыков, Ю.В. Определение остаточного ресурса металлоконструкций экскаваторов по истечении нормативного срока эксплуатации / Ю.В. Лыков, М.Ю. Насонов, **До Дык Чонг** // Сборник тезисов Международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019», Горный университет. – 2019. – С. 331-334.
63. Малышев, М.В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. / М.: Стройиздат, 1994. 228 с.
64. Махно, Д.Е. Надежность карьерных экскаваторов и станков шарошечного бурения в условиях Севера. / Д.Е. Махно. А.Н. Шадрин // М., Недра, 1976, 167 с.
65. Махно, Д.Е. Эксплуатация и ремонт карьерных экскаваторов в условиях Севера. / М., Недра, 1984. 183 с.
66. Махно, Д.Е. Эксплуатация и ремонт механических лопат в условиях севера. /М.: недра. 1992.127 с.
67. Махутов, К.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981, 272 с.
68. Махутов, Н.А. Методические аспекты оценки остаточного ресурса оборудования потенциально опасных промышленных объектов./ Н.А. Махутов, А.А. Шаталов, А.М. Лепихин, В.В. Москвичев, А.П. Черняев// Безопасность труда в промышленности. 2002, №11, С. 19–23.
69. Машины для землеройных работ. /Под ред. Бромберга. // М. 1964.
70. Митрофанов, А.В. Расчет остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением. / А.В. Митрофанов, С Б . Киченко. // Безопасность труда в промышленности. - 1999. - № 12. - С. 26-28.

71. Михайлов, Г.Г. Некоторые аспекты стратегии определения остаточного ресурса. / Г.Г. Михайлов, О.А. Конаков, А.Я. Колмаков. // Безопасность труда в промышленности. 2004, №1, С. 44–45.
72. Музгин, С С Эскавация крупнокусовой горной массы. / Алма-Ата: 1973. 121с.
73. Мюллер, Л. Инженерная геология: Механика скальных массивов. / М.: Мир. 1977. 255 с.
74. Насонов, М.Ю. Предотвращение загрязнений среды при авариях с экскаваторами на угольных предприятиях / М.Ю. Насонов, В.Г. Гореликов, **До Дык Чонг** // Экология и развитие общества – 2019. – №3(30). –С. 19-23.
75. Насонов, М.Ю. Критерий списания экскаваторов по накоплению повреждений после истечения нормативного срока эксплуатации / М.Ю. Насонов, **До Дык Чонг** // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2019. – № 12 (специальный выпуск 42) – 16 с.
76. Насонов, М.Ю. Изменение трещиностойкости металлоконструкций экскаватора экг-10 в процессе эксплуатации / М.Ю. Насонов, **До Дык Чонг** // Сборник тезисов VII Международной научно-практической конференции «XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers», Горный университет. – 2021. –С. 221-224.
77. Ольховатенко, В.Е. Инженерно-геологические условия строительства крупных карьеров в Кузнецком угольном бассейне. / Томск: Издательство Томского университета.
78. Отчет о НИР № 556 Б328289 "Исследование и разработка методов и средств повышения эксплуатационной надежности ГШО (горно–шахтного оборудования)".
79. Павлов, П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталостную и длительную прочность. /Л.: Машиностроение. 1988.
80. Панасюк, В.В. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. / В.В. Панасюк, М.П Саврук. , А.П. Дацишин // Киев. Наукова думка. 1976. 443 с.

81. Паначев, И.А. Исследование характеристик трещиностойкости сталей, применяемых при производстве шагающих экскаваторов. / И.А. Паначев, М.Ю. Насонов // Вестн. Кузбас. Гос. техн. ун-та. - 1999. - № 4. - С. 27-30
82. Паначев, И.А. Особенности открытой добычи и переработки углей сложноструктурных месторождений Кузбасса. / И.А. Паначев, А.Г. Нецветаев, И.И. Цепилов, В.И. Удовицкий // Кемерово. Кузбассвуиздат. 1997. 220 с.
83. Паначев, И.А. Трещинообразование в металлоконструкциях шагающих экскаваторов. /И.А.Паначев, А.В. Бирюков, М.Ю. Насонов, М.В. Беленко // Горный журнал «Известие ВУЗов» Екатеринбург. 2000 г. № 5. С. 117-122.
84. Паначев, И.А. Управление процессом взрывной подготовки пород при открытой разработке свиты угольных пластов. Дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук., Кемерово. 1992. 281 с.
85. Патент № 2763570 С1, МПК E02F 3/65 (2006.01). Шнековый исполнительный орган с внутренним двигателем для ковша карьерного экскаватора: №2021121294: заявл. 19.07.2021: опубл. 30.12.2021 / М.Ю. Насонов, **До Дык Чонг**; заявитель СПГУ. – 9 с. : ил.
86. Петров, В.А. О механизме и кинетике макроразрушения. /Физика тв. тела, 1979 –21, вып. 12, С. 3681–3686.
87. Петров, В.А. Физические процессы промышленной безопасности. / Безопасность труда в промышленности. 2005, № 9, С. 17–19.
88. Побегайло, П.А. Обоснование выбора точек контроля металлоконструкций экскаваторов – драглайнов / П.А. Побегайло, Д.Ю. Крицкий, А.В. Мутыгуллин, А.О. Шигин // Уголь. – 2018. - № 6. - С. 48-53. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2018-6-48-52>.
89. Постановление Правительства Вьетнама, № 60/QB–ТТg, о стратегии развития угольной промышленности до 2020 г (на вьетнамском языке). Ханой, –2009. website://vinacomin.vn/vi/news.

90. Проноза, В.Г. Обоснование структур эффективных технологических комплексов перевалки вскрышных пород. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Кемерово: КузПИ. 1992. 286 с.
91. Репин, Н.Я. К определению размеров зоны разрушения пород скважинными зарядами разного диаметра. / Н.Я. Репин, И.А. Паначев // Изв. вузов. – Горный журнал. 1969. № 1.
92. Репин, Н.Я. Определение гранулометрического состава массива горных пород. / Н.Я. Репин, А.В. Бирюков, И.А. Паначев, А.С. Ташкинов // Известия ВУЗов. Горный журнал, 1970, № 7. С. 37-41.
93. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород. / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик // М.: Недра. 359с.
94. Репин, Н.Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. /М.: Недра. 1978. 256 с.
95. Родионов, Г.В. К вопросу об определении усилий сопротивления внедрению ковша погрузочной машины в породу. / Г.В. Родионов, В.Ф. Сытник //«Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1965.
96. Руководство по неразрушающему контролю металлоконструкций роторных экскаваторов. / А.В. Краснов, Л.В. Седаков, Г.М. Овчинников и др. // Кемерово. Кемеровский ЦНТИ. ТД № 84–1921 –03 0. 1984. 318с.
97. Ряхин, В.А. Прочность и долговечность узлов одноковшовых экскаваторов. Обзор. / В.А. Ряхин, СМ. Борисов, Л.В. Зайцев, А.С. Иоффе // М.: ЦИНГИ по автоматизации и машиностроению ЦБТИ. 1963. 108 с.
98. Садовский, М.А. О распределении твердых отдельностей. / Докл. АН СССР. 1983. т. 269. № 1. С. 69–72.
99. Сосновцев, А.П. Малоцикловая усталость сварных швов РВС. / А.П. Сосновцев, М.В. Петровская. / КиберЛенинка: – 2019. – С. 9–11.
100. Состояние и перспективы разработки угля во Вьетнаме (на вьетнамском языке). Ханой, –2012. website://nangluongvietnam.vn/news/vn.

101. Тарасов, М.А. Моделирование параметров функционирования выемочной машины с вибрационным воздействием на горные породы / М.А. Тарасов // Устойчивое развитие горных территорий. - 2019. – Том 11. №1(39). С. 85-95.
102. Терцаги, К. Теория механики грунтов. / М.: Госстройиздат. 1961. 507с.
103. Тимошенко, Ю. Н. Информатизация технического обслуживания горного оборудования / Тимошенко Ю. Н., Иванов Г. Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 6. – С. 164–171.
104. Троценко, Д.А. Экспериментально–расчетный метод прогнозирования остаточного ресурса металлоконструкций мостовых кранов с использованием металлических пленок./ А.К. Давыдов, А.Н. Зайцев, П.В. Москвин, И.В. Лисихин // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 1. С. 25–28.
105. Флорин, В.А. Основы механики грунтов. /М.: Госстройиздат, ч. I, 1959, 256 с., ч. II, 1961, 263 с.
106. Хапонен, Н.А. Оценка остаточного ресурса элементов котлов. Сосудов, и трубопроводов./ Н.А. Хапонен, Ю.П. Гошков, А.А. Филичкин. / Безопасность труда в промышленности. 2002. № 11, С. 24–27.
107. Худошин, А.А. Оценка остаточного ресурса металла оборудования, работающего при статической нагрузке./ А.А. Худошин, В.А. Зимина, О.И. Кузнецов. // Безопасность труда в промышленности, 2001, № 10. С. 41–44.
108. Шаламанов, В.А. Результаты исследований некоторых свойств горных пород юга Кузбасса // Сб.: Повышение эффективности горнопроходческих работ. Кемерово: Издательство Кузбасского политехнического института, 1987, С. 125-131. Хапонен Н.А. Оценка остаточного ресурса элементов котлов. Сосудов, и трубопроводов./ Н.А. Хапонен, Ю.П. Гошков, А.А. Филичкин. / Безопасность труда в промышленности. 2002. № 11, С. 24–27.
109. Шаталов, А.А. Оценка работоспособности и остаточного ресурса тонкостенных сварных сосудов химически опасных промышленных объектов. / А.А. Шаталов, М.П. Закревский, М.П. Лепихин, В.В. Москвичев,

- Е.В. Анискович, А.П. Черняев.// Безопасность труда в промышленности. 2003. № 7. С. 34–36.
110. Штумпф, Г.Г. Инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации разрезов./ Г.Г. Штумпф, В.А. Шаламанов // Сб.: Проблемы открытой добычи угля в Кузбассе. Кемерово: Родник. - 1990. - С. 177-183.
 111. Штумпф, Г.Г. Некоторые закономерности изменения физических свойств горных пород Кузнецкого угольного бассейна // Сб.: Совершенствование технологии сооружения горных выработок. Кемерово: Издательство Кузбасского политехнического института. - 1986. - С. 45-50.
 112. Штумпф, Г.Г. Плотностные свойства горных пород Кузнецкого бассейна и основные факторы, влияющие на них // Сб.: Разработка угольных месторождений открытым способом. - Кемерово: Издательство Кузбасского политехнического института. - 1980. - С. 24-28.
 113. Штумпф, Г.Г. Сравнительная оценка прочности горных пород, определяемой различными методами./ Г.Г. Штумпф, Н.М. Молов // Уголь Украины. - 1992. - № 2. - С. 10-15.
 114. Штумпф, Г.Г. Физико-механические свойства и инженерно-геологические особенности массивов горных пород Кузнецкого угольного бассейна // Сб.: Напряжения и деформации в массивах горных пород при разработке месторождений полезных ископаемых./ М.: ИПКОН АН СССР. - 1988. - С. 85-94.
 115. Штумпф, Г.Г. Физико-механические свойства горных пород нижних горизонтов Кузбасса // Уголь. - 1979. - № 2. - С. 58-60.
 116. Штумпф, Г.Г. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: Справочник. / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов, А.И. Петров. // М.: Недра. - 1994. - 447 с.
 117. Ягодкин, Г.И. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. / Г.И. Ягодкин, М.П. Мохначев, М.Ф. Кунтыш // М.: Наука. - 1971. – 148с.

118. Ямщиков, В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. /М.: Недра. - 1982. - 282 с.
119. Autodesk Inventor Simulation 2010: Начало работы // Autodesk, Inc. All Rights Reserved. 2009, 76 p.
120. Nasonov, M.Yu. Survivability of metal structures of excavators in the development of non-blasted rocks / Nasonov M.Yu., Lykov Yu.V., **Do Duc Trong** // XVII International Forum-Contest of Students and Young Researchers “Topical Issues of Rational Use of Natural Resources”, Секция «Innovations and Prospects for the Development of Mining Mechanical Engineering», Санкт-Петербург, Горный университет. – 2021. –С. 115-116.
121. Nasonov, M.Yu. The study of the resource and durability of metal structures of excavators after the expiration of the service life / Nasonov M.Yu., Lykov Yu.V., **Do Duc Trong** // Ugol’ – 2020. – №. 2. – pp. 13-17. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-13-17.
122. Panfilova, O.R. Substantiation of parameters of metal structure elements of mining transport machines// News of the Ural State Mining University. 2020. Issue 2(58), pp. 110-116. DOI 10.21440/2307-2091-2020-2-110-116.
123. Stanislav, Lealin. Stress Analysis, Frame Analysis and Calculation of Metal Structures in Inventor Software / Stanislav, Lealin // Applied Mechanics and Materials. 2015, vol. 809-810, pp. 871-877. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.871.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения

(Институт Энергетического и Горного Машиностроения – Винакомин)

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И
ГОРНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ –
ВИНАКОМИН

Адрес: Д. 565, ул. Нгуен Трай, Тхань Суан Нам,
Тхань Суан, г. Ханой, Вьетнам

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
Института Энергетического и
Горного Машиностроения –
Винакомин.

к.т.н., До Чунг Хиеу

« 28 » Марта 2022 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования До Дык Чонг «Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.05.06 – Горные машины, в процесс реализации научных проектов «Института Энергетического и Горного Машиностроения – Винакомин».

Разработанный автором подход к определению долговечности экскаваторов на ряде угольных разрезов Вьетнама с учетом принимаемых решений с целью постановки на ремонт и дальнейшей их эксплуатации позволил получить достоверные научные данные по областям фундаментальных положений механики деформированного твердого тела, теории упругости, строительной механики, механики разрушений, математического анализа; корректности сделанных допущений при построении математических моделей; представительным объемам экспериментальных данных, полученных в лабораторных и промышленных условиях; использовании современного компьютерного оборудования и математического программного обеспечения.

Заместитель директора



До Чунг Хиеу

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт внедрения (Промышленного университета Куангниня)

ПРОМЫШЛЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ КУАНГНИНЬ
Адрес: Йен Тхо, Донг Чьеу, г.Куангнинь, Вьетнам.
Тел.: +84.0203.3871292
Факс: 0203.3871/292
Сайт: <http://qui.edu.vn>

УТВЕРЖДАЮ
Проректор Промышленного
университета Куангниня.
к.т.н., Буй Тхань Нху

« 10 » февраля 2022 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования До Дык Чонг «Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.05.06 – Горные машины в учебный процесс Промышленного университета Куангниня.

Разработанный автором подход к определению долговечности экскаваторов на ряде угольных разрезов Вьетнама с учетом принимаемых решений с целью постановки на ремонт и дальнейшей их эксплуатации предлагается для изучения на практических занятиях при обучении студентов специальности «Горные машины» в рамках дисциплин «Надежность горного оборудования», «Современные машины для горных работ», «Транспортные машины и комплексы современных транспортных машин», «Приложения для улучшения проектирования горных машин и оборудования».

В ходе практических занятий студенты знакомятся с областью применения методов анализа литературных источников; аналитическими и лабораторными исследованиями; натурными испытаниями с обобщением результатов методами математической статистики; моделированием работы металлоконструкций экскаваторов на основе методов строительной механики, теории упругости, механики разрушения; научного обобщения теоретических и экспериментальных исследований.

Проректор



К.т.н., Буй Тхань Нху

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 763 570** (13) **C1**
 (51) МПК
E02F 3/65 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
E02F 3/65 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021121294, 19.07.2021
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 19.07.2021
 Дата регистрации:
 30.12.2021
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 19.07.2021
 (45) Опубликовано: 30.12.2021 Бюл. № 1
 Адрес для переписки:
 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,
 ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный
 университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
 Насонов Михаил Юрьевич (RU),
 До Дык Чонг (RU)
 (73) Патентообладатель(и):
 федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования «Санкт-Петербургский горный
 университет» (RU)
 (56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: SU 1756600 A1, 23.08.1992. SU 376532
 A1, 05.04.1973. SU 1286788 A1, 30.01.1987. SU
 1278407 A1, 23.12.1986. SU 1303678 A1,
 15.04.1987. RU 2081251 C1, 10.06.1997. EP
 2770114 A1, 27.08.2014.

(54) ШНЕКОВЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН С ВНУТРЕННИМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ КОВША КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

(57) Реферат:

Изобретение относится к горной промышленности, в частности к исполнительным органам экскаваторов – ковшам для добычи угля и других полезных ископаемых открытым способом. Техническим результатом является снижение энергопотребления при погрузке средне- и мелкокусковых взорванных и невзорванных пород и сокращение числа подготовительных движений по раскладке и разворачиванию горной массы. Предлагается шнековый исполнительный орган с внутренним двигателем для ковша карьерного экскаватора, включающий ковш, боковые стенки, подшипники, разрушающий барабан. При этом разрушающий барабан установлен в передней части ковша экскаватора и выполнен в виде шнекового исполнительного органа в форме двух полых

цилиндров, внешнего и внутреннего, которые установлены друг в друга с возможностью вращения внешнего цилиндра вокруг неподвижного внутреннего цилиндра, внутри которого закреплены диафрагмы жесткости в форме круга с отверстием, выполненным в центре, в которое установлен продольный вал, который закреплен сменяемыми подшипниками к боковым стенкам ковша. С наружной стороны внешнего цилиндра спиралеобразно закреплены лопасти в форме спирали, при этом одна часть спирали выполнена с правым наклоном, а вторая – с левым, на лопастях сверху установлены зубья, электродвигатель с редуктором установлены внутри внутреннего цилиндра на стойке, которая жестко закреплена к защитной боковой стенке. 4 ил.