

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Довгань Александр Юрьевич

УДК 622.232.72

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА
ТИПА КСП-35 НА ОСНОВЕ ОБОСНОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И
ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ**

Специальность 2.8.8 Геотехнология, горные машины (технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Шабает О.Е.

Донецк – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	11
1.1 Актуальность вопроса	11
1.2 Обзор литературы по теме диссертации	18
1.3 Цель и задачи исследования	28
РАЗДЕЛ 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ	30
2.1 Объект, условия проведения, методика и средства экспериментальных исследований	31
2.2 Методика обработки экспериментальных данных	36
2.3 Влияние смещения проходческого комбайна на показатели эффективности его функционирования	39
2.4 Выводы по разделу 2	44
РАЗДЕЛ 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ОСЕВУЮ КОРОНКУ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАССИВА	46
3.1 Режимы работы исполнительного органа и схема разрушения забоя	46
3.2 Математическая модель разрушаемого массива и поверхности забоя	48
3.3 Математическая модель определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки	60
3.4 Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке как функционально законченный элемент	65
3.5 Оценка адекватности математической модели	66
3.6 Выводы по разделу 3	68

РАЗДЕЛ 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В ПРОХОДЧЕСКОМ ЗАБОЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ	70
4.1 Исследование влияния точности позиционирования проходческого комбайна в выработке на показатели эффективности его работы и ресурс отдельных элементов трансмиссии	71
4.2 Разработка метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки	94
4.3 Исследование влияния количества и погрешности измерений на формирование корректирующего воздействия	100
4.4 Выводы по разделу 4	107
РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА	109
5.1 Структура и алгоритм работы средств позиционирования проходческого комбайна	109
5.2 Структура и алгоритм работы системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа	113
5.3 Позиционирование коронки ИО проходческого комбайна в системе координат выработки	118
5.4 Выводы по разделу 5	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	134
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Традиционным ископаемым энергетическим ресурсом Российской Федерации является каменный уголь. Донбасс обладает значительными запасами угля высокого качества в недрах и полноценной производственной базой для его добычи и обогащения. Основными потребителями угля являются теплоэлектростанции и металлургические предприятия.

По данным института ДонУГИ среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев на шахтах ДНР составляет до 68,3 м/мес. При этом скорость проведения подготовительных выработок не превышает 45,6 м/мес. Своевременная подготовка новых забоев и магистральных выработок требует повышения темпов проходки. Механизированный способ прохождения выработок позволяет достичь наибольшие темпы среднемесячного продвижения проходческого забоя. При этом эффективность работы проходческого участка определяется производительностью проходческого комбайна, отлаженностью производственного процесса и скоростью выполнения вспомогательных операций. На шахтах Донецкой Народной Республики применяются проходческие комбайны стреловидного типа как с продольно-осевыми коронками – ГПКС, КСП32, КСП35, EBZ-160, так и с поперечно-осевыми – КПД. Наибольшее распространение (75,3%) получили проходческие комбайны серии КСП производства ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод».

Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки, вследствие погрешностей ручного управления. В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по

контуру выработки, недостаточное использование мощности привода резания и, как следствие, снижение производительности проходческого комбайна и ресурса элементов трансмиссии.

Поэтому одним из основных направлений повышения эффективности работы проходческого комбайна является повышение его производительности и ресурса путем обеспечения требуемой точности позиционирования комбайна в выработке, что требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Степень разработанности темы исследования. К проблеме позиционирования горных машин в выработке обращались ученые с момента появления идеи безлюдной добычи полезных ископаемых в 1970-х годах. При этом основное внимание уделялось безопасности ведения проходческих работ и, по возможности, выведению оператора из опасной зоны. В современных же исследованиях упор делается на позиционировании машины с определением траектории ее движения в толще породы и установлением направления движения. Все большее количество научных работ посвящается развитию мехатронных подходов при создании горных машин. Оснащение машин интеллектуальными системами управления на базе компьютерной техники позволяет существенно повысить их технический уровень и устранить недостатки ручного управления.

Однако, вопросу влияния позиционирования проходческого комбайна в выработке уделяется внимание только с точки зрения сохранения направления выработки. Не достаточно изучено и теоретически не обосновано влияние смещение машины относительно продольной оси выработки на производительность, энергоэффективность и ресурс проходческого комбайна.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы проходческого комбайна типа КСП-35 на основе разработанных методов и средств его позиционирования в выработке с учетом установленных закономерностей влияния положения комбайна относительно забоя на ресурс и производительность.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Установить степень реализации потенциальных возможностей проходческого комбайна КСП-35 по разрушению забоя в представительных условиях его эксплуатации.

2. Разработать математическую модель формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе проходческого комбайна с продольно-осевой коронкой.

3. Исследовать влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования и обосновать требуемую точность позиционирования машины.

4. Разработать метод определения положения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и обосновать требования к параметрам измерений.

5. Разработать структуру и алгоритм работы средств позиционирования проходческого комбайна и формирования контура выработки.

Объект исследования. Процесс разрушения забоя проходческим комбайном стреловидного типа с продольно-осевой коронкой

Предмет исследования. Закономерности влияния позиционирования проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на эффективность процесса разрушения забоя.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые теоретически установлены и экспериментально подтверждены зависимости производительности, удельных энергозатрат и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа от величины смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки.

2. Разработана математическая модель процесса разрушения горного массива проходческим комбайном избирательного действия с осевой коронкой, отличающаяся формированием стружки с учетом предыдущего реза в текущем цикле разрушения и соответствующих проходов исполнительного органа в предыдущих циклах, а также с учетом смещения комбайна относительно продольной оси выработки при его передвижке между циклами обработки забоя.

3. Впервые предложен метод определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки с использованием дальномера с изменяемым углом поворота чувствительного элемента и с коррекцией по трем осям наклона корпуса комбайна.

4. Впервые разработаны алгоритм и математическая модель определения местоположения проходческого комбайна в системе координат выработки, учитывающие его смещение в процессе работы и после передвижки с учетом изменения углов наклона корпуса комбайна по трем осям.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии теории функционирования проходческого комбайна избирательного действия на основе разработанных методов и средств позиционирования комбайна в выработке с учетом установленных закономерностей влияния его положения относительно забоя, обеспечивающих повышение производительности и ресурса, а также снижение удельных энергозатрат.

Практическая значимость работы заключается в:

– разработке методики обработки экспериментальных данных длительной записи нагрузочных характеристик электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна избирательного действия для оценки энергоемкости и производительности процесса разрушения;

– установлении показателей параметров рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой в представительных условиях его эксплуатации;

– разработке алгоритма, математической модели и программной реализации метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки;

– разработке методики обработки массивов данных расстояния до стоек крепи при обосновании требований к точности и количеству измерений для удержания машины в пределах заданного диапазона смещения относительно продольной оси выработки;

- установлении требований к точности позиционирования проходческого комбайна, обеспечивающих повышение его эффективности работы и надежности;
- разработке структуры и алгоритма функционирования дальномера с изменяемым углом наклона чувствительного элемента с компенсацией углов поворота по осям корпуса проходческого комбайна;
- разработке структуры и алгоритма функционирования системы позиционирования проходческого комбайна в выработке и формирования ограничительного контура выработки с учетом позиционирования машины в системе координат выработки и изменения углов наклона по осям;
- разработке методики определения ограничивающих углов подъема и поворота исполнительного органа, допустимого поля координат коронки и в формировании требуемого контура выработки любой формы.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования обеспечивалось на основе системного подхода к изучению проблемы и рационального сочетания теоретических и экспериментальных исследований. При разработке математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке использовались методы теории резания угля и породы резовыми рабочими инструментами выемочных машин. Экспериментальные исследования по установлению влияния смещения проходческого комбайна на его производительность и энергоемкость разрушения забоя реализованы на основе методов планирования эксперимента в представительных условиях эксплуатации проходческих комбайнов с использованием современных методов и средств измерений. Для проведения теоретических исследований применен модельный эксперимент (методы имитационного моделирования).

Положения, выносимые на защиту:

1. Впервые в представительных условиях эксплуатации проходческого комбайна КСП-35 установлена значительная неравномерность характеристик рабочего процесса разрушения проходческого забоя ($Q_{ц} = 0,23 \pm 0,10$ м³/мин, $W_{ц} = 4,33 \pm 2,28$ кВт·ч/м³, $P_{ц} = 56,45 \pm 18,90$ кВт), обусловленная смещением машины

относительно продольной оси выработки вследствие погрешности ее «ручного» управления.

2. Теоретически установлено, что смещение комбайна относительно продольной оси выработки на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению теоретической производительности до 43,7%, повышению удельных энергозатрат на разрушение до 64,1 %, а также снижение ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа до 64 %.

3. Предложен метод определения местоположения проходческого комбайна в системе координат выработки с использованием дальномера с изменяемым углом поворота чувствительного элемента и с коррекцией по трем осям наклона корпуса комбайна. Установлено, что необходимым и достаточным условием реализации точности позиционирования проходческого комбайна относительно продольной оси выработки в пределах коридора $\pm 0,05$ м является обеспечение точности определения расстояния до арок крепи не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований, основанной на системном подходе, рациональном сочетании теоретических и экспериментальных методов исследования, корректностью поставленных задач и принятых допущений. Теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях теоретической механики, аналитической геометрии и теории резания горных пород. Экспериментальные исследования реализованы на основе методов планирования эксперимента в представительных условиях эксплуатации с использованием современных средств и методов электрических измерений. Максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при модельном и шахтном эксперименте не превысило $\pm 15\%$.

Основные положения диссертации опубликованы в 10 научных трудах в том числе: 5 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, а также 5

публикаций материалов и тезисов на международных и всероссийских форумах и конференциях. Подана заявка на изобретение № 2024101050 от 03.07.2023 г. «Система позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 153 страницы машинописного текста и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 122 источников на 15 страницах. Основной текст, изложенный на 133 страницах, иллюстрируется 43 рисунками и содержит 12 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Актуальность вопроса

Обеспеченность энергоресурсами обуславливает развитие промышленности любой страны и является одним из основных критериев оценки ее экономического состояния и фактором прогрессивного развития в будущем. На сегодняшний день традиционным ископаемым энергетическим ресурсом Донецкой Народной Республики и Российской Федерации является каменный уголь. Донецкая Народная Республика обладает значительными запасами угля различного качества в недрах и полноценной производственной базой для его добычи. Общие промышленные запасы в 94 шахтопластах угледобывающих предприятий Министерства угля и энергетики ДНР насчитывают 853738 тыс. т. [1]. Добываемые марки угля могут удовлетворить потребности металлургической промышленности и энергетики страны. Кроме того, угледобывающие предприятия способны обеспечить значительные объемы экспорта угольной продукции.

По данным института «ДонУГИ», для шахтопластов угледобывающих предприятий ДНР характерно наличие всех марок угля – от Д до А, а именно: ГП «ДУЭК» – Д, ДГ, Г, Ж, К, ОС, Т; ГП «Макеевуголь» – К, ОС, Т, А; ГП «Торезантрацит» – А; ПАО «Ш/у «Донбасс» – Ж, К, Т, А; ГП «Ш. им. А.Ф. Засядько» – Г, Ж, К; ГП «Ш. «Комсомолец Донбасса» – Т. Уголь 46 шахтопластов (48,9 % от общего количества) пригоден для коксования (323524 тыс. т промышленных запасов, или 37,9 % от общего количества).

На рисунке 1.1 представлена диаграмма распределения промышленных и балансовых запасов угля на шахтах ДНР. Как видно из диаграммы, наибольшими промышленными запасами угля обладают шесть первых предприятий. На них приходится 73 % запасов. Также значительными запасами обладают шахты «Холодная балка», «Ясиновская-Глубокая», «Илловайская».

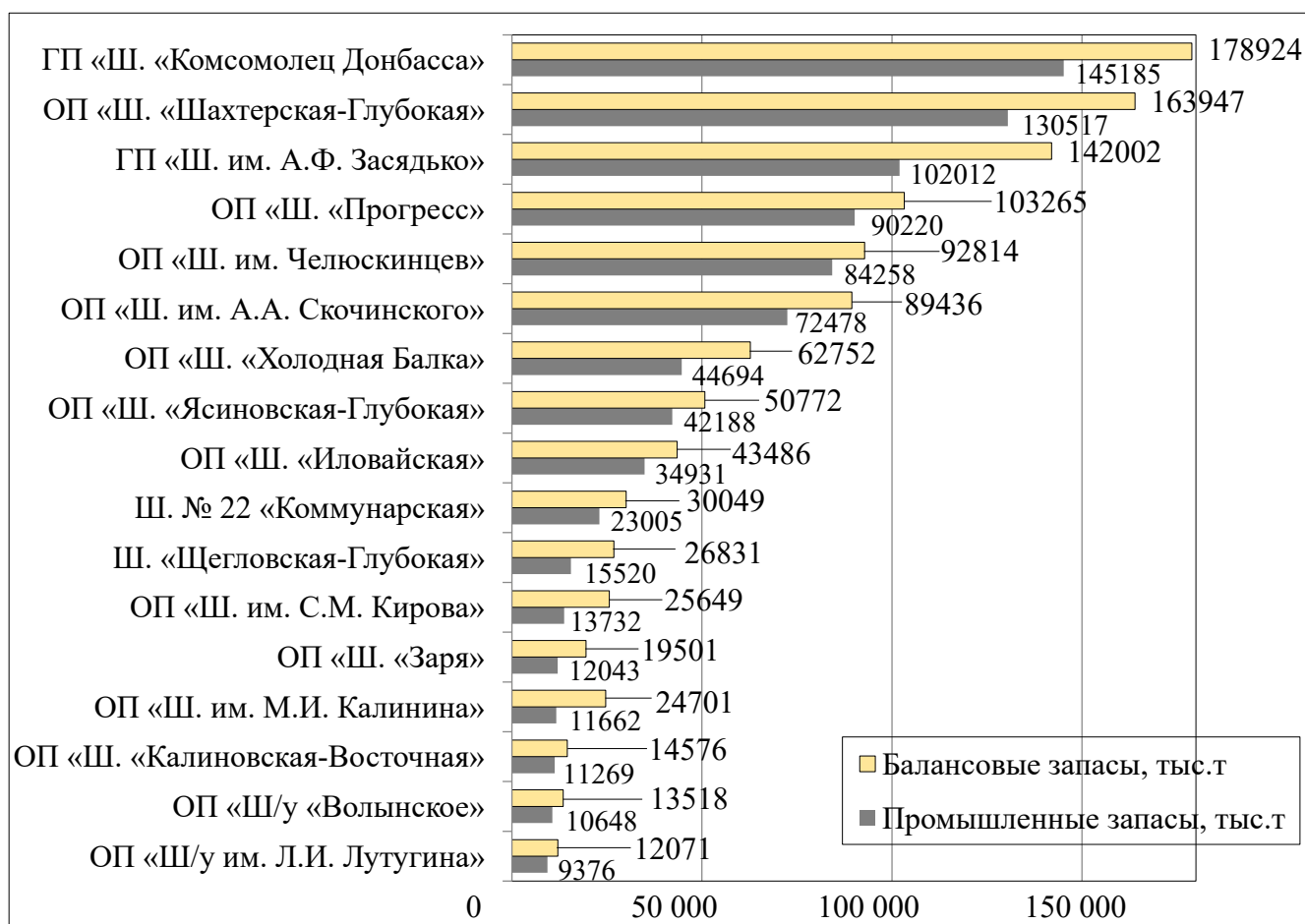


Рисунок 1.1 – Балансовые и промышленные запасы угля на угледобывающих предприятиях Министерства угля и энергетики ДНР

Не смотря на современные тенденции по отказу от ископаемого топлива в энергетике и переходу к возобновляемым источникам энергии, добыча угля еще десятилетия не утратит своей актуальности в силу роста населения в развивающихся странах, повышения уровня урбанизации и увеличения нагрузки на инфраструктуру. Каменный уголь энергетических марок будет и далее востребован как сырье для ТЭС, коксующийся уголь востребован в металлургии, угли антрацитовой группы, кроме энергетики, имеют дополнительное применение в качестве частичной замены для коксующихся углей. При этом, переход к другим источникам энергии, таким как природный газ, атом, ветровая или солнечная генерация требует значительных инвестиций для замены тепловых электростанций и наращивания мощностей генерации. Донбасский уголь также имеет и экспортный потенциал в страны Африки и Азии. На рисунке 1.2 приведена диаграмма

распределения добычи угля из добычных забоев и общая (данные 2019 г.), которая показывает потенциал угольных предприятий по добыче сырья. Общая годовая добыча составляет около 49 млн.т.



Рисунок 1.2 – Добыча угля на угледобывающих предприятиях Министерства угля и энергетики ДНР

На конец 2018 г. на 17 шахтах ДНР действовало 108 подготовительных забоев, на отдельных шахтах их количество составляло от 2 (ОП «Ш. им. Челюскинцев» ГП «ДУЭК» и ОП «Ш/у им. Л.И. Лутугина» ГП «Торезантрацит») до 12 подготовительных забоев (ОП «Ш/у «Волынское» ГП «Торезантрацит»). Объем проведения подготовительных выработок с погрузкой угля и породы комбайнами в 2018 г. в целом по шахтному фонду составил 8211 м.

Своевременная подготовка новых забоев и магистральных выработок требует повышения темпов проходки. Механизированный способ прохождения выработок позволяет развить наибольшие темпы среднемесячного продвижения

проходческого забоя. При этом эффективность работы проходческого участка определяется производительностью проходческого комбайна, отлаженностью производственного процесса и скоростью выполнения вспомогательных операций.

По данным ДонУГИ [1, с. 34] среднемесячное подвигание линии действующих очистных забоев на шахтах ДНР составляет до 68,3 м/мес. При этом средняя скорость проведения подготовительных выработок не превышает 45,6 м/мес.

На шахтах Донбасса применяются в основном три технологии ведения проходческих работ: БВР, механизированная проходка комбайнами и проходка с отбойным молотком. При этом скорость проходки при БВР и площади сечения 11-13 м² составляет от 20 до 45-50 м/мес., с отбойным молотком – до 60 м/мес., а проходческими комбайнами – от 60 м/мес. и более. На рисунке 1.3 приведено среднемесячное подвигание очистных и проходческих забоев на шахтах ДНР. Как видно из диаграммы, на шахтах с номерами 1, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 15 наблюдается отставание проходческих забоев от очистных. Шахтах с номерами 5, 12, 14 отсутствует опережение проходческих забоев над добычными.

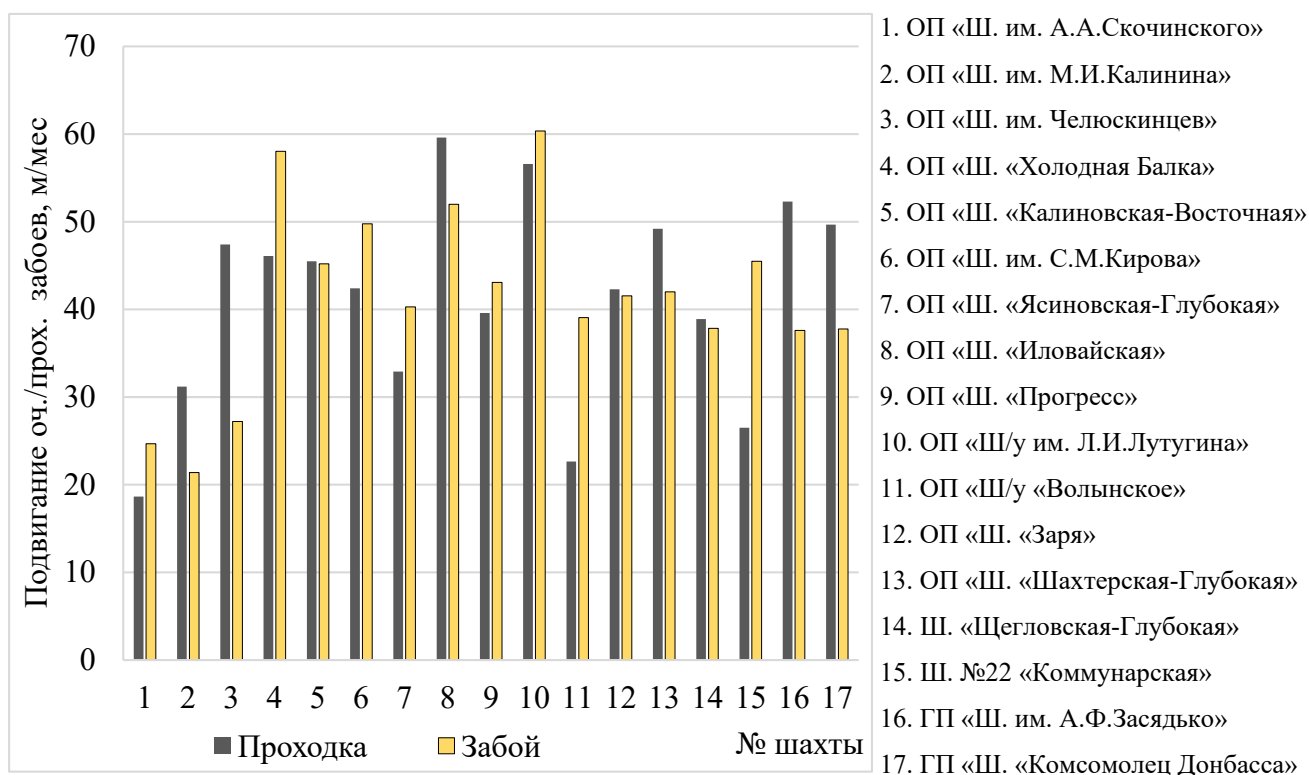


Рисунок 1.3 – Среднемесячное подвигание очистных и проходческих забоев на шахтах ДНР

Проведение выработок проходческими комбайнами применяется на 7 шахтах: в ГП «ДУЭК» (ОП «Ш. им. Челюскинцев» – уровень проведения составил 53,0 %), в ГП «Макеевуголь» (ОП «Ш. «Холодная Балка» (9,2 %); ОП «Ш. им. С.М. Кирова» (23,5 %), ОП «Ш. «Иловайская» (33,3 %); в ГП «Торезантрацит» (ОП «Ш. «Шахтерская-Глубокая» (68,9 %)); в ГП «Ш. им. А.Ф. Засядько» (98,0 %); в ГП «Ш. «Комсомолец Донбасса» (28,1 %) (см. рисунок 1.4). Отставание проходки и недостаточное применение проходческих машин объясняется горно-геологическими условиями или отсутствием инвестиций в основные фонды. При этом, применение на «ш. им. А.Ф. Засядько», «Комсомолец Донбасса», «Ш. им. Челюскинцев» и на ш. «Шахтерская-Глубокая» проходческих комбайнов позволяет значительно нарастить темпы ведения проходческих работ и обеспечивают существенное опережение очистных работ.

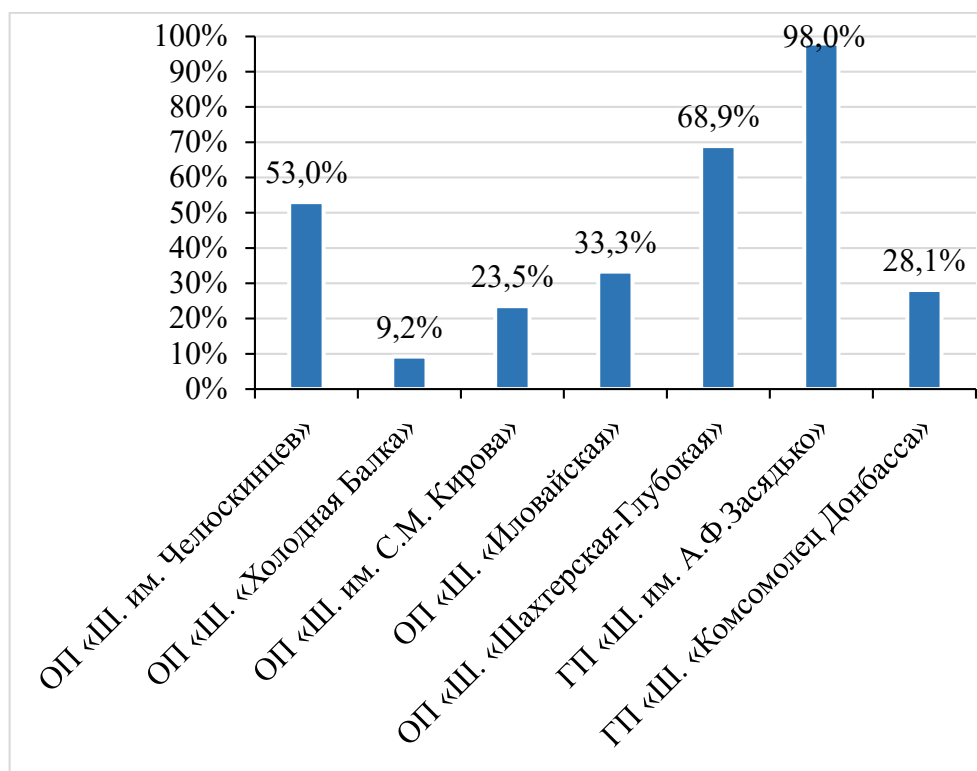


Рисунок 1.4 – Проведение выработок проходческими комбайнами в процентах от общего объема проведения подготовительных выработок на шахтах ДНР

На 9 шахтах числится 46 проходческих комбайнов. Из общего количества проходческих комбайнов находится в работе 22 шт. (47,8 %), в ремонте – 15 шт.

(32,6 %), в резерве – 4 шт. (8,7 %), в монтаже – 1 шт. (2,2 %), в демонтаже и нерабочем состоянии – по 2 шт. (4,3 %). Количество комбайнов с коэффициентом износа до 80 % составляет 18 шт. (39,1 %), 80,1–90,0 % – 5 шт. (10,9 %), 90,1–100,0 % – 23 шт. (50,0 %).

На конец 2018 г. на шахтах ДНР действовало 15 подготовительных забоев с применением проходческих комбайнов. Количество оборудования по типам составило:

- ГПКС – 1 шт. ОП «Ш. «Холодная Балка» ГП «Макеевуголь»;
- КСП32 – 6 шт.: 4 шт. – ОП «Ш. «Шахтерская-Глубокая» ГП «Торезантрацит»; 2 шт. – ГП «Ш. «Комсомолец Донбасса»);
- КСП35 – 5 шт.: 1 шт. - ОП «Ш. им. С.М. Кирова» ГП «Макеевуголь», 4 шт. – ГП «Ш. им. А.Ф. Засядько»;
- КПД – 2 шт.: 1 шт. – ОП «Ш. «Иловайская» ГП «Макеевуголь»; 1 шт. – ГП «Ш. «Комсомолец Донбасса»;
- EBZ-160 – 1 шт. ГП «Ш. «Комсомолец Донбасса».

В процентном соотношении проходческие комбайны были представлены на шахтах следующими типами: ГПКС (3,3 %); КСП32 (40,0 %); КСП35 (33,3 %); КПД (14,4 %), EBZ-160 (6,0 %) (см. рисунок 1.5).

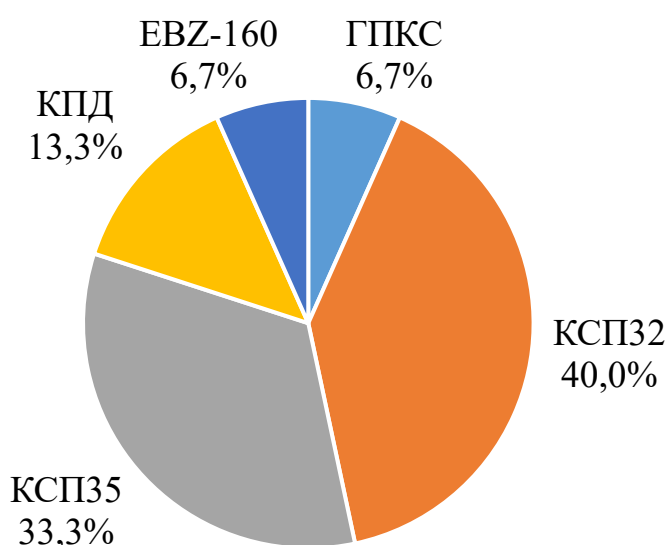


Рисунок 1.5 – Применение проходческих комбайнов при прохождении выработок на шахтах Министерства угля и энергетики ДНР (в % от общего количества)

Выбор объекта исследования обусловлен следующими соображениями:

- механизированная проходка при помощи комбайнов является наиболее эффективной технологией и обеспечивает наибольшие темпы прохождения подготовительных выработок на шахтах Министерства угля и энергетики ДНР;
- проходческие комбайны избирательного действия с осевыми коронками более широко распространены на шахтах ДНР по сравнению с аксиальными (более 86 %);
- комбайны типа КСП составляют наибольшее количество из представленных на шахтах ДНР (более 70 %);
- комбайн КСП-35 лучше технически оснащен, энерговооружен и имеет систему автоматизированного управления.

Основными показателями эффективности функционирования проходческого комбайна являются производительность и энергоэффективность. При этом ресурс агрегатов влияет на частоту ремонта и, соответственно, длительность простоев. На показатели эффективности работы проходческого комбайна влияют горно-геологические, горно-технические факторы, конструктивные и режимные параметры проходческого комбайна. Стабильность показателей эффективности от цикла к циклу на максимальном уровне обеспечивает высокий уровень среднемесячного подвигания проходческого забоя.

Одним из способов повышения эффективности функционирования проходческого комбайна является обеспечение точности его позиционирования в выработке относительно продольной оси от цикла к циклу. При ручном управлении имеет место нестабильность и большой разброс характеристик рабочего процесса проходческого комбайна, обусловленный смещением машины относительно продольной оси выработки в процессе разрушения забоя и после его передвижки. Современные проходческие комбайны Ясиноватского машзавода типа КСП позволяют применять средства автоматизации, позволяющие повысить безопасность ведения проходческих работ путем выведения оператора из опасной зоны, однако они не способны обеспечить обоснованный коридор позиционирования машины в выработке.

Актуальность вопроса повышения эффективности работы проходческого комбайна обусловлена следующим:

– на балансе шахт ДНР сохраняются значительные объемы промышленных запасов угля энергетических и коксующихся марок, что является залогом энергетической безопасности и стратегической промышленной стабильности в регионе;

– существенное отставание проходческих забоев от очистных на шахтах ДНР обусловлено применением технологии БВР и отбойных молотков, не позволяющих обеспечить темпы проходки более 60 м/мес.;

– наибольшие темпы ведения проходческих работ достигаются механизированным способом при помощи проходческих комбайнов. Заявленная скорость проведения выработок – более 100 м/мес.;

– проходческие комбайны стреловидного типа с осевыми коронками Ясиноватского машзавода наиболее распространены на шахтах ДНР, и повышение их эффективности позволит повысить их конкурентоспособность на рынке РФ и Казахстана;

– ошибки оператора при позиционировании проходческого комбайна в выработке являются причиной нестабильности показателей эффективности ПК от цикла к циклу, что снижает темпы ведения проходческих работ.

Таким образом, вопрос повышения эффективности функционирования проходческого комбайна остается актуальным и требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

1.2 Обзор литературы по теме диссертации

Вопросам создания проходческих комбайнов и способам повышения эффективности их работы посвящены научные труды и диссертационные работы многих ученых. В разработке новых подходов к конструированию проходческой техники участвуют научно-исследовательские и проектно-конструкторские

институты, высшие учебные заведения и заводы тяжелого машиностроения. Среди них можно выделить:

НИИ: ДонУГИ, Донуглемаш, ИГД им. А.А. Скочинского, Автоматгормаш им. В.А. Антипова;

ВУЗы: Донецкий национальный технический университет, Южно-российский государственный политехнический университет, Санкт-Петербургский горный университет, Московский государственный горный университет, Кузнецкий, Тульский, Карагандинский технические университеты,

Иностранные компании: «JOY», «XCMG», «Corum Group», «Sandvik»;

Заводы: Ясиноватский, Новокраматорский, Горловский, Копейский и Юргинский машиностроительные заводы и многие другие.

Разработчиком и заводом-изготовителем проходческого комбайна КСП-35 является Ясиноватский машиностроительный завод, производителями аппаратуры управления является Макеевский завод шахтной автоматики и институт «Автоматгормаш им. В.А. Антипова».

Значительный вклад в решение этих вопросов внесен:

академиками: Поляковым Н.С., Потураевым В.Н., Докукиным А.В., Франчуком В.П.;

докторами технических наук: Алейниковым А.А., Бароном Л.И., Бероном А.И., Бойко Н.Г., Бреннером В.А., Верескуновым Н.Г., Веркловым Б.А., Гетопановым В.Н., Глатманом Л.Б., Горбатовым П.А., Гуляевым В.Г., Кантовичем Л.И., Картавым Н.Г., Кондрахиным В.П., Корнеевым С.В., Красниковым Ю.Д., Лаптевым А.Г., Малевичем Н.А., Паламарчуком НВ., Позиным Е.З., Рачеком В.М., Сафохиным М.С., Семенчей П.В., Семенченко А.К., Силаевым В.И., Солодом Г.И., Стадником Н.И., Сысоевым Н.И., Хориным В.Н., Шабаетовым О.Е., Яцких В.Г. и другими;

кандидатами технических наук: Дейниченко В.А., Кутовым В.И., Лукиенко В.Г., Меламедом В.З., Мизиным В.А., Модиновым В.В., Петрушкиным Г.В., Погибко М.Г., Пшеничным И.Д., Семенченко Д.А., Симоновым И.А., Синенко В.В., Солодухиным В.В., Старичневым В.В.,

Степаненко Е.Ю., Тоном В.В., Хиценко А.И., Хиценко Н.В., Шендриком А.В. и другими;

инженерами Кузиным Ю.М., Литвиновым Г.А., Локшинским С.Г., Миничевым В.И., Самсоновым Г.Н., Юргилевичем В.А. и другими.

Основы теории разрушения горных пород [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] разработаны под руководством А.М. Терпигорьева, М.М. Протодяконова, А.И. Берона, Е.З. Позина, Л.Б. Глатмана и других ученых. Они базируются на результатах многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в ИГД им. А.А. Скочинского и ДонУГИ [9, 10, 11, 12, 13]. По результатам исследований установлены основные характеристики пород, описывающие их прочностные свойства и абразивность [14, 15, 16], закономерности влияния геометрических параметров резца, ширины и толщины среза на значения составляющих сил резания, действующих на резец при разрушении пород с различными физико-механическими свойствами [17, 18]. На основе этих исследований предложены методики описания составляющих сил резания при разрушении углей и пород [19, 20, 21, 22]. Эти методики позволяют учесть основные прочностные и хрупко-пластические свойства разрушаемого массива, его напряженное состояние, а также геометрию резца и режимные параметры разрушения. В силу простоты аналитических зависимостей, они широко используются в научных исследованиях и инженерных расчетах для определения средних значений составляющих силы резания и пригодны для оценки мощности и удельных энергозатрат на разрушение при резании.

Дальнейшее развитие основы теории резания получили в работах [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32], выполненных под руководством Докукина А.В., Красникова Ю.Д., Бойко Н.Г., Гуляева В.Г., Горбатова П.А., Кондрахина В.П., Семенченко А.К. Шабеева О.Е. и других ученых. На основе проведенных исследований [33, 34, 35, 36, 37] в настоящее время предложен экспериментально-статистический метод описания сил, действующих на грани резца, как случайных величин или случайных функций. Статистическое представление сил, формирующихся на гранях резца, рассматривается как последовательность

случайных циклов (внедрение резца в массив, развитие ядра и скола элементов массива), подчиненных закону Вейбула [38, 39]. Существенное влияние кинематических изменений заднего угла радиального резца на средние значения составляющих сил резания доказано результатами исследований. На основе большого числа экспериментальных исследований исполнительных органов, радиальных и аксиальных коронок, выявлены основные факторы, определяющие величину и характер изменения составляющих вектора внешнего возмущения, и предложены математические модели для его описания [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51].

Значительное количество исследований было направлено на изучение закономерностей формирования динамических нагрузок практически во всех силовых системах комбайнов. В этих работах установлены закономерности формирования внешних нагрузок и нагруженности элементов, выявлены факторы и режимы работы машины, оказывающие определяющее влияние на безотказность, выносливость и ресурс ее работы в целом, и на ее силовые системы. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований было установлено, что факторами, оказывающими определяющее влияние на эффективность работы проходческих комбайнов, являются: схема набора режущего инструмента, погрузочная способность, передаточное число редуктора привода исполнительного органа, схема обработки забоя и другие факторы.

Работы [52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59] посвящены исследованию динамического функционирования проходческих комбайнов методом математического моделирования. При математическом описании динамических процессов в комбайне выделены подсистемы привода, механизма подачи и механизма фиксации исполнительного органа. При этом модели должны учитывать обратные связи в системе «комбайн-забой», которые проявляются в процессе стружкообразования на резцах исполнительного органа, перемещающегося в пространстве забоя [60] и случайные составляющие нагрузки на резцы исполнительного органа [61]. В работах [62, 63, 64] предложен метод разработки имитационных математических моделей рабочих процессов выемочных машин как

пространственных многомассовых динамических систем переменной структуры на базе использования наборов функционально законченных элементов (ФЗЭ). При этом комплексная имитационная модель динамического функционирования комбайна представляет собой взаимоувязанную совокупность частных математических моделей ФЗЭ. Также разработано большое количество математических моделей рабочих процессов в основных силовых системах проходческих комбайнов: привода резания [65, 66, 67, 68, 69, 70], подсистемы подачи исполнительного органа [71, 72, 73], подсистемы подвески исполнительного органа [74, 75, 76, 77]. В этих работах установлены закономерности влияния параметров силовых систем на показатели эффективности функционирования проходческого комбайна (производительность и ресурс).

Нагруженность силовых систем комбайна во многом формируется в результате «внешнего» возмущения – сил резания горной породы на рабочем инструменте коронки, суммарное воздействие которых на исполнительный орган приводится к вектору внешнего возмущения. Математическому описанию формирования вектора внешнего возмущения посвящены работы, выполненные под руководством Ю.Д. Красникова, В.Г. Гуляева, А.К. Семенченко, Н.Г. Бойко, П.А. Горбатова, В.П. Кондрахина, О.Е. Шабаева и других ученых. На основе большого числа экспериментальных и теоретических исследований исполнительных органов очистных и проходческих комбайнов, оснащенных режущим инструментом, выявлены закономерности формирования составляющих вектора внешнего возмущения и предложены математические модели для его описания. Специфика работы исполнительного органа проходческих комбайнов с поперечно-осевой коронкой учтена в работах [78, 79]. Здесь предложено математическое описание образования поверхности забоя с учетом многообразия режимов обработки забоя, особенностей кинематики движения стреловидного исполнительного органа и формы коронки. Моделирование работы исполнительного органа в условиях сложной структуры забоя с учетом пространственных колебаний стрелы и корпуса комбайна рассмотрено в работах [80, 81].

Как показали исследования [82, 83, 84], в процессе эксплуатации ПК выявлена значительная неравномерность значений характеристик рабочего процесса вследствие погрешностей ручного управления. В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода, что приводит к существенному снижению производительности и ресурса комбайна, т.е. использованию не в полной мере потенциальных возможностей, заложенных в машину.

Следует отметить, что оснащение машин интеллектуальными системами управления на базе компьютерной техники позволяет существенно повысить их технический уровень и устранить указанные недостатки. Сложность конструкций горных машин, переменность во времени их положения при высоких требованиях к их эксплуатационной эффективности требует максимальной взаимоувязки подсистем и адаптивной оптимизации рабочих процессов этих машин.

В угольном машиностроении вопросы использования принципов мехатроники рассмотрены в 1997-2004 гг. в работах доктора технических наук П.А. Горбатова [85, 86, 87]. В этих работах было сформулировано концептуальное положение о необходимости новой философии при проектировании сложных горных машин на основе мехатронного подхода.

Развитию мехатронных подходов при создании горных машин посвящается все большее количество научных работ. Так в работах [88, 89, 90, 91, 92, 93] предложены условия мехатронности, принципы формализации и классификации мехатронных объектов, приведены функциональные и структурные модели горных машин, на примере мехатронного узла привода подачи очистного комбайна показано применение принципов мехатроники. В работах [94, 95] на основе анализа специфических особенностей применения горных машин разработаны функциональные модели, рассмотрены особенности и методологические основы проектирования комплекса синергетически связанных между собой мехатронных машин, обеспечивающих механизацию подземной добычи угля при высокой степени безопасности работ.

Еще одним направлением повышения эффективности обработки забоя проходческим комбайном является программное управление разрушением массива. При этом одной из проблем в работе проходческого комбайна является его смещение во время работы, которое приводит к переборам и необходимости дополнительных работ по забутовке. При достижении коэффициента переборов $\beta = 1,054$ при крепости пород $f > 3-4$ сокращается время крепления выработки до 20 % [96]. На величину смещения комбайна влияют следующие факторы: крепость пород обрабатываемого забоя, крепость пород почвы выработки, влажность почвы, квиваж почвы по осям выработки. Система управления, учитывающая факторы смещения стрелы исполнительного органа в координатах проходческого забоя, позволяет уменьшить переборы по сечению выработки и свести к минимуму вспомогательные операции по подготовке забоя к креплению.

В работе [97] отдельно выделена проблема непосредственного участия человека в рабочем процессе и его влияние на качество управления, возможные ошибки и влияние на снижение производительности. Рассмотрены вопросы стратегических направлений развития систем и средств автоматизации горно-шахтного оборудования и систем оперативно-диспетчерского управления. Обоснованы приоритеты в создании локальных роботизированных комплексов. Сформулированы концептуальные аспекты развития автоматизации шахт в целях повышения безопасности труда путем создания интеллектуальных систем управления горно-шахтным оборудованием. Создание автоматизированных роботизированных систем с высокими интеллектуальными возможностями позволит повысить безопасность и производительность горно-шахтного оборудования и снизит нагрузку на оператора.

С развитием вычислительной техники изменяются требования к системам управления проходческими машинами и к проектированию новой техники. Делается упор на интеллектуальное управление с повышением количества учитываемых факторов для снижения влияния оператора на качество обработки забоя. Мехатронный подход требует одновременного проектирования силовой части и системы управления комбайном. Проходческий комбайн представляется

системой взаимодействующих элементов между собой и внешними факторами среды, вносящими свой вклад в рабочий процесс.

Ошибки в позиционировании машины в выработке могут быть вызваны смещением во время работы вследствие недостаточной устойчивости и повышенных динамических нагрузок или ошибкой оператора и смещением комбайна относительно продольной оси выработки. При этом снижается эффективность и производительность работы машины, теряется направление выработки, увеличивается время цикла, растягиваются технологические операции по креплению выработки.

К проблеме позиционирования горных машин в выработке обращались ученые с момента появления идеи безлюдной добычи полезных ископаемых в 1970х годах. При этом основное внимание уделялось безопасности ведения проходческих работ и, по возможности, выведению оператора из опасной зоны. Институт «Автоматгормаш», г.Донецк [98], российские [99], а также иностранные [100] ученые активно участвуют в развитии идей программной обработки забоя и роботизации горного оборудования. При этом влияние позиционирования проходческого комбайна в выработке на техническую производительность, удельные энергозатраты на разрушение, нагруженность и ресурс силовых систем комбайна изучено не в полной мере.

В современных исследованиях [101] упор делается на позиционировании машины с определением траектории ее движения в толще породы и установлением направления движения. В работе [102] предлагается мультисенсорная система позиционирования проходческого комбайна с использованием гироскопа, инерциальных датчиков, электронного тахеометра, контрольной метки-мишени и датчиков раздвижности гидродомкратов. При этом привязка ведется к магнитному полюсу земли, а не к реальной выработке. На основе технологии Time-Difference-of-Arrival (TDOA), используемой в [103], предлагаются три алгоритма позиционирования: Indirect positioning algorithm (IPA-D) (алгоритм косвенного позиционирования), Taylor series expansion algorithm (Taylor-D) (разложение в ряд Тейлора), и Chan positioning algorithm (Chan-D) (алгоритм позиционирования

Чана). При первом алгоритме достигается лучший результат и на дистанции 95 м достигается сантиметровая точность, после чего идет нарастание ошибки. В [104] предлагается использование лазеров и меток для позиционирования щитовых комбайнов. В [105, 106, 107] предлагаются системы лазеров в выработке, лазерных камер и маркеров с алгоритмом для определения смещения. Этот метод измерения показывает ошибку смещения до 10 мм с использованием высокоточных лазеров. Рассмотренные методы имеют ряд недостатков: избыточное количество датчиков, отвязка от реальной выработки и привязка к магнитным полюсам, использование маркеров, размещение стационарных лазерных излучателей в выработке. В то же время, использование лазеров с фильтрующими элементами позволяет работать подобным системам в условиях повышенной запыленности.

Авторами [108] в качестве технического решения поставленной задачи предлагается применение технологии BLE (Bluetooth Low Energy). При этом iBeacon-маячки сбрасываются по ходу движения комбайна, а датчик, прикрепленный сзади бункера-перегрузателя, считывает расстояние до маячка. Здесь решается маркшейдерская задача сохранения направления выработки, обусловленная необходимостью оставления целиков и камер заданных проектируемых размеров в целях прежде всего сохранения несущей мощности водозащитной толщи. При этом ведется борьба с зашумленностью измерений. Для обработки моделируемых измерений и правильного определения дистанции маячок-датчик использован алгоритм Калмановской фильтрации.

В работе [109] авторы выделяют недостаток применением микроэлектромеханических систем, которые на практике оказываются чувствительными к внешним воздействиям, сильно зашумленными, а также в некоторых случаях имеют накапливающуюся ошибку ориентации. Задача повышения точности ориентации функциональных элементов горных машин успешно решается фильтрацией сигналов МЭМС-датчиков (акселерометра, гироскопа и магнетометра) комплексированным фильтром Маджвика в реализации MARG. Функционирование магнетометра (электронного компаса) на горных машинах затруднено постоянно возникающими магнитными дисторсиями,

исходящими от металлических частей конструкции и силовых агрегатов. Эффективное решение этой проблемы состоит в имитации работы магнетометра для фильтра Маджвика с помощью глобальной навигационной спутниковой системы.

В статье [110] представлен анализ условий работы горнопроходческой техники, представлена оценка функционирования электронных устройств и средств связи под землей, а также сформулированы основные функциональные и нефункциональные требования к системе инерциального позиционирования. Большинство существующих решений инерциального позиционирования используется в таких устройствах, как корабли, подводные лодки, самолеты, беспилотные автомобили, для которых характерна высокая скорость передвижения, в отличие от горных машин. Все существующие методы инерциального позиционирования разработаны для быстрого изменения координат и не способны улавливать медленное перемещение. Также необходимо изменять углы наклона во время проходки. Эта возможность требует точного измерения углов наклона относительно вектора силы тяжести, выраженных в углах Эйлера: крен, тангаж, рысканье.

В работе [111] предлагается метод решения задачи автоматической ориентации проходческого комбайна, основанный на навигации по высокоточному 3D датчику пространственной ориентации. В течение проходческого цикла с задаваемым шагом дискретности по времени запоминаются показания датчика по трем координатам, тем самым фиксируется динамика отклонения пространственного положения комбайна. По окончании очередного цикла контроллер управления вычисляет пространственную смещенность направления и углов наклона ПК относительно начала проходческого цикла. На основании вычисленных смещенностей и программного задания направления определяются величины рассогласования для выполнения управления механизмами ПК коррекции нового пространственного положения перед началом следующего цикла с целью минимизации отклонения по направлению прохождения горной выработки.

Вышеприведенный краткий обзор и анализ научной и технической литературы по теме диссертации показал, что вопросам теории резания, эффективности разрушения забоя, повышения производительности горных машин, повышения ресурса, оптимизации рабочих параметров горной машины уделено большое внимание, и задача повышения эффективности работы проходческого комбайна сохраняется. При этом разработаны математические модели, описывающие принцип работы как отдельных узлов машины, так и проходческого комбайна в целом, модели для определения вектора внешнего возмущения на коронке исполнительного органа. Параллельно ведутся работы по программной обработке забоя, позиционированию горных машин в выработке и проведению выработок различной конфигурации. Предлагаются устройства и системы позиционирования, основанные на различных физических принципах измерения и различной конфигурации. При этом позиционирование проходческого комбайна в выработке не связывается с эффективностью его работы. Отсутствуют сведения об оптимальном показателе смещения проходческого комбайна от продольной оси выработки и его влиянии на производительность проходческого комбайна, энергоэффективность и ресурс элементов трансмиссии.

По ряду рассматриваемых вопросов необходимы дополнительные исследования, которые докажут негативное влияние смещения проходческого комбайна на эффективность его функционирования, и это позволит разработать техническое решение для обеспечения точности позиционирования корпуса проходческого комбайна в выработке и коронки его исполнительного органа.

1.3 Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы проходческого комбайна типа КСП-35 на основе разработанных методов и средств его позиционирования в выработке с учетом установленных закономерностей влияния положения комбайна относительно забоя на ресурс и производительность.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. Установить степень реализации потенциальных возможностей проходческого комбайна КСП-35 по разрушению забоя в представительных условиях его эксплуатации.

2. Разработать математическую модель формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе проходческого комбайна с продольно-осевой коронкой.

3. Исследовать влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования и обосновать требуемую точность позиционирования машины.

4. Разработать метод определения положения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и обосновать требования к параметрам измерений.

5. Разработать структуру и алгоритм работы средств позиционирования проходческого комбайна и формирования контура выработки.

РАЗДЕЛ 2**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО
ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В
ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Работы, выполняемые проходческим комбайном, имеют циклический характер. Одной из периодически повторяющихся операций является передвижка ПК после каждого цикла обработки забоя. В процессе работы из-за повышенного уровня нагрузок, вибрации, различной структуры и влажности почвы изменяется положение машины в пространстве выработки. При этом ориентация проходческого комбайна в пространстве выработки возложена на оператора и полностью зависит от его опыта и навыков. Позиционирование проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и углы поворота по осям определяют форму забойного пространства, что может привести к существенному разбросу текущих значений глубины зарубки исполнительного органа, повлиять на другие режимные параметры его работы и, в конечном итоге, снизить эффективность функционирования.

Данное экспериментальное исследование призвано решить поставленную задачу – установить влияние позиционирования проходческого комбайна в выработке на использование установленной мощности двигателя резания, производительность и удельные энергозатраты. При выявлении отклонения показателей эффективности работы комбайна от цикла к циклу необходимо определить разброс параметров производительности и удельных энергозатрат, вызванный отклонением проходческого комбайна от продольной оси выработки.

2.1 Объект, условия проведения, методика и средства экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования был принят, проходческий комбайн среднего типа КСП-35 (рисунок 2.1).

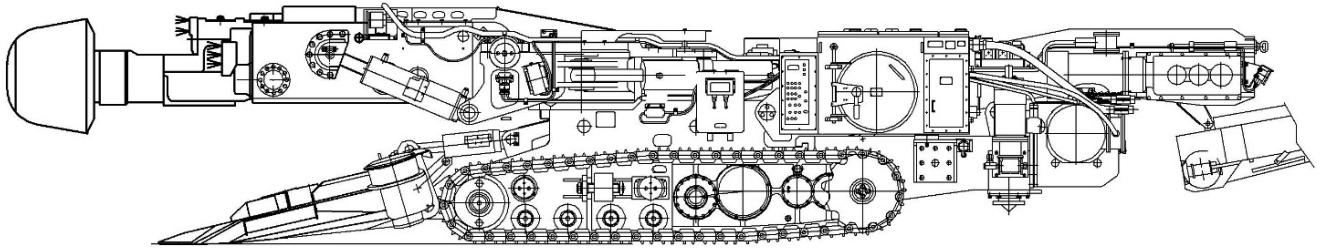


Рисунок 2.1 – Проходческий комбайн типа КСП-35

КСП-35 относится к проходческим комбайнам избирательного типа с продольно-осевым фрезерным исполнительным органом. По данным Ясиноватского машзавода принятые конструктивные решения позволили по сравнению с предшествующей моделью КСП-32 повысить энерговооруженность до 250 кВт, снаряженная масса увеличена до 52 т (в отдельных исполнениях – до 130 т), ширина траков составляет 740 мм, что уменьшило давление на почву. Ширина става скребкового конвейера увеличена с 534 мм до 670 мм, скорость движения цепи – 1,1 м/с. Уровень питающего напряжения повышен до 1140 В с возможностью переключения на 660 В в станции управления [112].

Рассматриваемый проходческий комбайн предназначен для механизированного разрушения забоя и погрузки горной массы при проведении горизонтальных и наклонных до $\pm 12^\circ$ горных выработок сечением от 10,5 до 35 м² по смешанному забою с пределом прочности разрушаемых пород до 80 МПа (при рассматриваемом диаметре коронки) и абразивностью до 15 мг в шахтах опасных по газу (метану) и угольной пыли.

При проектировании данной машины применен мехатронный подход с внедрением средств измерения основных параметров работы комбайна (датчики тока двигателей, расхода и давления воды в системе орошения), применены

электрогидроклапаны в общей схеме управления и микропроцессорная система управления для реализации автоматизированных режимов управления в том числе дистанционного в/вне зоне/зоны видимости. Система управления проходческим комбайном КСП-35 оснащена функцией «черный ящик», которая позволяет сохранять на съемном носителе параметры работы двигателей резания и насосной станции.

Краткие технические характеристики проходческого комбайна КСП-35 приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Краткие технические характеристики комбайна КСП-35

Параметр	Значение
Общие сведения	
Верхний предел прочности разрушаемых пород, $\sigma_{сж}$ (типоразмер коронки 1100 мм), МПа	80
Абразивность пород, мг, не более	15
Техническая производительность резания, м ³ /мин, не менее	0,45
Максимальное сечение выработки по размаху стрелы с одной установки, м ²	35
Диапазон углов наклона проводимых выработок, град.	±12
Размах стрелы исполнительного органа, мм, не менее:	
- по высоте	5000
- по ширине	7500
- ниже уровня почвы	190
Питание и энерговооруженность	
Напряжение электропитания, В	1140/660
Частота тока, Гц	50
Суммарная номинальная мощность электродвигателей комбайна и перегружателя, кВт	250
Исполнительный орган	
Диаметр коронки по резцам, мм	1050
Ход телескопа, мм	650
Мощность электродвигателя исполнительного органа, кВт	132
Частота вращения режущей коронки, с ⁻¹ (об/мин)	3,66 (35)
Максимальная линейная скорость подачи стрелы, м/мин	2,8

Условия проведения исследований. Исследования проводились при прохождении проходческим комбайном КСП-35 монтажного ходка 8-й восточной лавы пл. 1₄ на шахте им. А.Ф. Засядько в течение двух недель работы. Шахтные исследования проводились сотрудниками ЧАО НПП «Макеевский завод шахтной автоматики» при непосредственном участии автора. Схема разработки пласта – прямой ход по комбинированной схеме разработки с повторным использованием конвейерного штрека в качестве вентиляционного. Разрушение пространства забоя производилось по типовой технологической схеме с одного захода с зарубкой в угольный пласт, послойным разрушением пород снизу вверх. Проведение выработки сопровождалось повторяющимися операциями крепления, бурения шпуров в рамках антивибросовых мероприятий.

В соответствии с паспортом проведения и крепления монтажного ходка длина выработки составляет 280 м, сечение – 17,8 м² в проходке с шагом установки крепи – 0,65 м. Угол падения пласта – 11 град. Пласт опасен по газу, взрывчатости угольной пыли, суфлярным выделениям метана, внезапным выбросам угля и газа, содержит включения (линзы, стяжения пирита), приток воды – до 3 м³/час. На рисунке 2.2 представлена структура пород проходческого забоя. Структура проходческого забоя представляющая собой наслоение алевролита, угля, аргиллита и алевролита (от почвы к кровле).

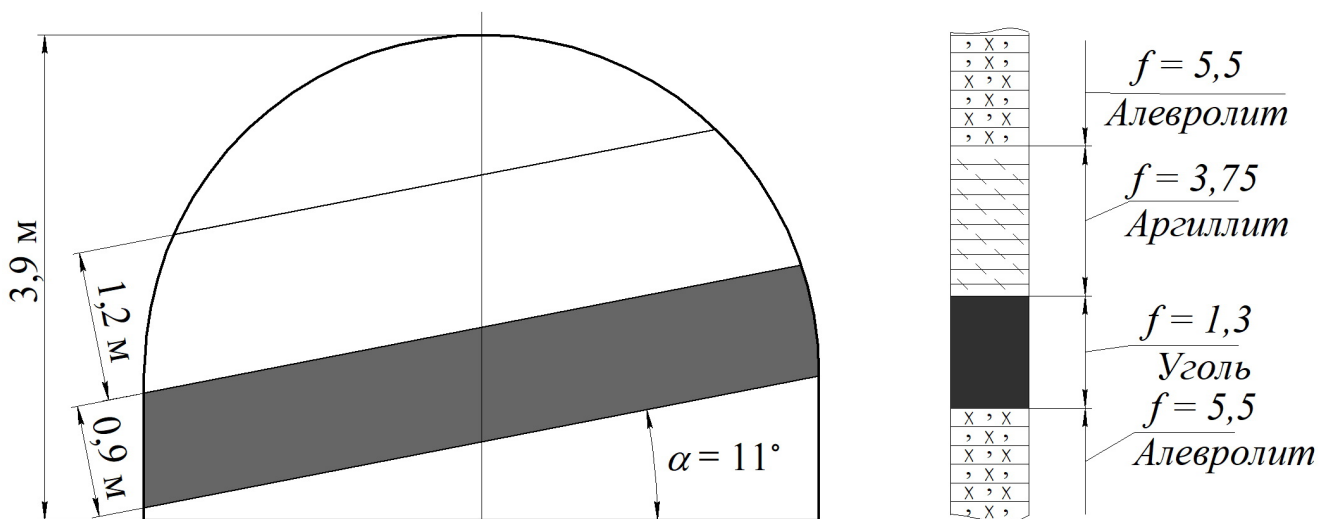


Рисунок 2.2 – Структура пород проходческого забоя

По данным ДонУГИ [1, с. 11] промышленные запасы угольных пластов, имеющих угол падения до 18° , составляют 86,3 %. Большая часть промышленных пластов угледобывающих предприятий сосредоточена в пластах мощностью до 1,2 м (71,5 %). Для шахтопластов характерны различные сочетания категорий вмещающих пород по устойчивости кровли и почвы и обрушаемости массива пород как для всей совокупности шахтопластов, так и для отдельного шахтопласта в пределах его площади. По классификации М.М. Протодьяконова породы угленосной толщи Донецкого бассейна относятся к породам главным образом от V (средние по крепости) до II (очень крепкие) категории. [113] В подавляющем большинстве шахт кровля и почва разрабатываемых пластов представлены сланцами (80 %), чаще глинистыми, реже – алевритовыми. Неустойчивыми в большинстве случаев являются ложные кровля и почва, представленные маломощными (до 1-2 м) слоями глинистых и алевритовых сланцев. Широко развито явление пучения почв, особенно в районах распространения углей марок Д-К. Наиболее устойчивы породы в районах распространения антрацитов и полуантрацитов.

Из 183 горных выработок, проводимых проходческими комбайнами и планируемых в 2018-2028 гг. на угледобывающих предприятиях Министерства угля и энергетики 146 (79,8 %) имеют площадь сечения в свету от $13,0 \text{ м}^2$ до $20,1 \text{ м}^2$.

Таким образом, условия проведения исследований можно считать представительными.

Комбайн КСП-35 запитан от передвижной трансформаторной подстанции напряжением 660 В. В соответствии с паспортом комбайна КСП-35 номинальная мощность двигателя исполнительного органа составляет 132 кВт. Номинальный ток составляет 134 А (при 660 В) при $\cos\varphi = 0,86$.

Для проведения шахтного эксперимента была разработана методика проведения исследования, в соответствии с которой в течение 288 часов (12 суток) осуществлялась непрерывная регистрация с шагом 1 с действующего значения тока двигателя, усредненного за 1 с. С целью возможности дальнейшей обработки

полученных массивов данных одновременно осуществлялся хронометраж работы комбайна.

Методика и средства экспериментальных исследований. Фиксация токов электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна осуществлялась штатной системой управления. Система управления проходческого комбайна КСП-35 оснащена функцией записи и хранения данных о работе двигателей для проведения диагностики исправности основных узлов машины. Структурная схема подсистемы сбора и передачи данных представлена на рисунке 2.3.

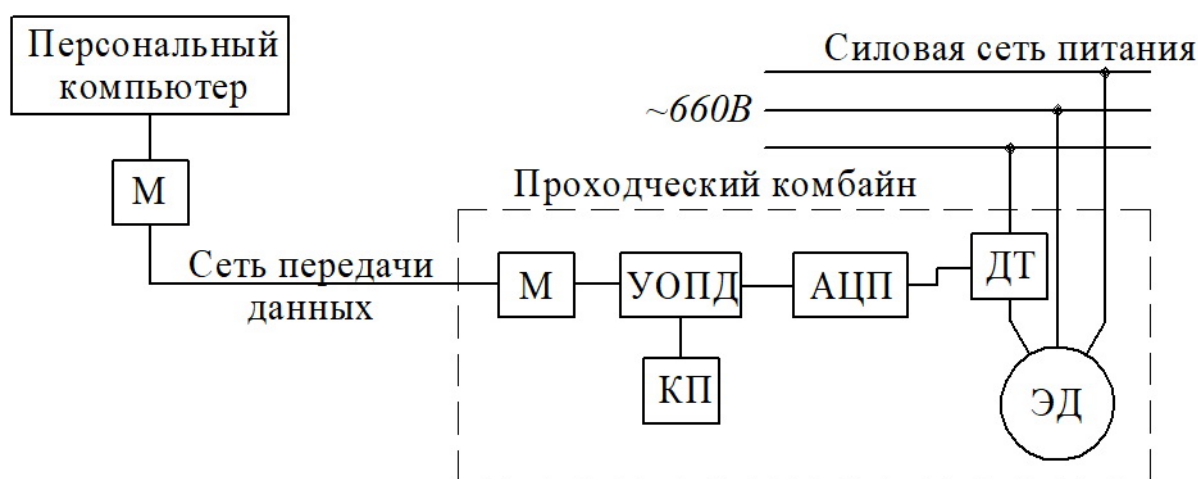


Рисунок 2.3 – Структурная схема подсистемы сбора, обработки и передачи данных

Обозначения приняты на рисунке 2.3: М – модем, УОПД – устройство обработки и передачи данных, КП – карта памяти, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ДТ – датчик тока.

Подсистема сбора, обработки и передачи данных работает следующим образом. Запись фазных токов двигателя резания ведется непрерывно. От датчика тока сигнал поступает на АЦП, и после преобразования передается в УОПД. Устройство преобразования и передачи данных проводит усреднение данных один раз в секунду, первичную обработку, формирование пакетов для передачи с помощью модема М и запись данных на съемный носитель – КП.

В качестве примера на рисунке 2.4 представлен фрагмент записи тока электродвигателя привода исполнительного органа за цикл разрушения горного массива комбайном КСП-35 во вторую смену 15.11.2016 г. В ходе проведения эксперимента уставка технологического перегруза была установлена на значении 173 А, ток опрокидывания составляет 360 А, уставка максимальной токовой защиты – 1730 А.

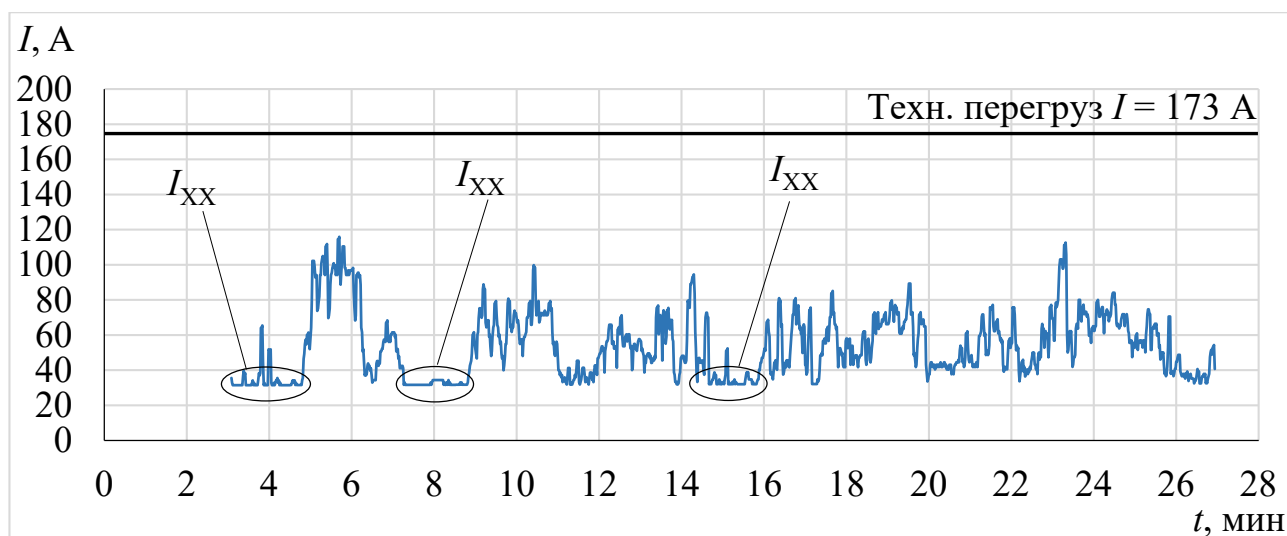


Рисунок 2.4 – Фрагмент записи тока двигателя за цикл обработки забоя

За время проведения экспериментальных исследований проанализировано 25 циклов обработки забоя комбайном КСП-35.

2.2 Методика обработки экспериментальных данных

Для оценки энергоемкости процессов разрушения горного массива коронкой исполнительного органа (ИО) на основе результатов проведенных шахтного эксперимента разработана методика обработки экспериментальных данных. Структурная схема представлена на рисунке 2.5.

При обработке массива данных значений тока двигателя исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 получены i -дискретных значений тока j -цикла I_{ij} с равным шагом $\Delta t = 1$ с, которые впоследствии использованы для определения средних и экстремальных значений (блок 1 Методики).

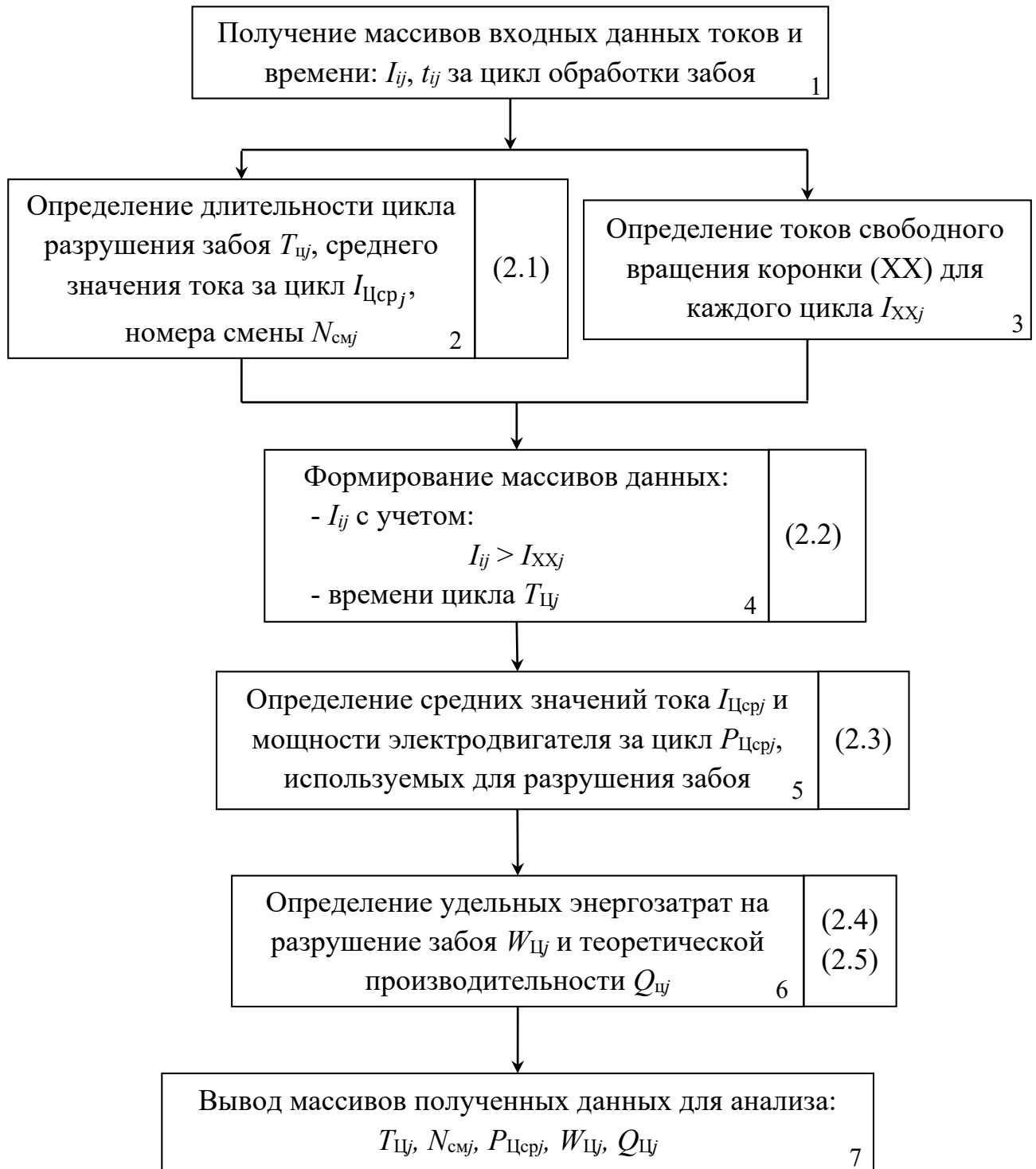


Рисунок 2.5 – Структурная схема методики обработки данных

Номер смены $N_{смj}$ в j -том цикле определяется по хронометражу измерений.

Определение времени цикла и среднего тока за цикл (блок 2):

$$T_{Цj} = n_{Ij} \cdot \Delta t, I_{Цсрj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} I_{\Phi ij}}{n_j} \quad (2.1)$$

где n_{Ij} – количество дискретных значений тока в j -том цикле.

Определение и исключение токов свободного вращения ИО проходческого комбайна осуществляется при отыскании на графике нагрузки привода минимальных значений тока I_{XX} . На рисунке 2.4 овалами отмечены зоны свободного вращения ИО без нагрузки, которые не учитываются при определении времени цикла обработки забоя и, соответственно, среднего тока нагрузки ИО для каждого цикла.

С использованием специализированного программного обеспечения, установленного на персональном компьютере на поверхности шахты были получены характеристики рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна КСП-35. Удаление из массивов значений тока свободного вращения коронки ИО производилось для исключения погрешности при определении средней мощности за цикл на разрушение и удельных энергозатрат. Для каждого цикла ток холостого хода I_{XXj} определен отдельно и составляет от 31,5 А до 35,3 А. Разброс значений тока I_{XXj} обусловлен колебанием параметров сети в разные дни, изменением температуры редуктора.

Для получения времени цикла, используемого на разрушение забоя, полное время каждого j -го цикла $T_{Цj}$ сокращается на количество n_{XXj} периодов измерения Δt , соответствующих значениям тока свободного вращения (блок 4).

$$T_{Цj} = T_{Цj} - n_{XXj} \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

Полученные значения параметров среднего тока и исходные паспортные данные комбайна КСП-35 позволяют определить мощность комбайна, расходуемую на разрушение массива (блок 5):

$$P_{Цсрj} = \sqrt{3} \left(I_{Цсрj} - I_{XXj} \right) \cdot \frac{P_{НОМ}}{I_{НОМ} \cdot \eta_{\Sigma}} \cdot \cos(\varphi(I)) \quad (2.3)$$

где $P_{НОМ}$ – номинальная мощность двигателя исполнительного органа;

$\eta_{\Sigma} = 0,8$ – суммарный КПД исполнительного органа, учитывающий КПД двигателя и редуктора ИО;

$\cos(\varphi(I))$ – зависимость коэффициента мощности двигателя от полного тока, полученная экспериментально для данного двигателя.

Для определения теоретической производительности проходческого комбайна в функции мощности привода исполнительного органа используется зависимость:

$$Q_j = \frac{S \cdot B}{T_{\text{ц}j}} \quad (2.4)$$

где S – сечение выработки; B – глубина зарубки, соответствует половине шага крепи.

С учетом выражений (2.3 и 2.4) для каждого цикла обработки забоя определяется значение удельных энергозатрат на разрушение забоя, кВт·ч/м³ (блок 6):

$$W_{\text{ц}j} = \frac{P_{\text{цср}j}}{60 \cdot Q_{\text{ц}j}} \quad (2.5)$$

Для каждого цикла обработки забоя по полученным характеристикам создается массив рассчитанных выходных значений $T_{\text{ц}j}$, $N_{\text{см}j}$, $P_{\text{цср}j}$, $W_{\text{ц}j}$, $Q_{\text{ц}j}$ (блок 7).

2.3 Влияние смещения проходческого комбайна на показатели эффективности его функционирования

На рисунке 2.6 представлена гистограмма распределения средней мощности электродвигателя исполнительного органа $P_{\text{ц}j}$ комбайна КСП-35, используемой за полный цикл разрушения забоя. Рассмотрено 25 циклов во вторую, третью и четвертую смены.

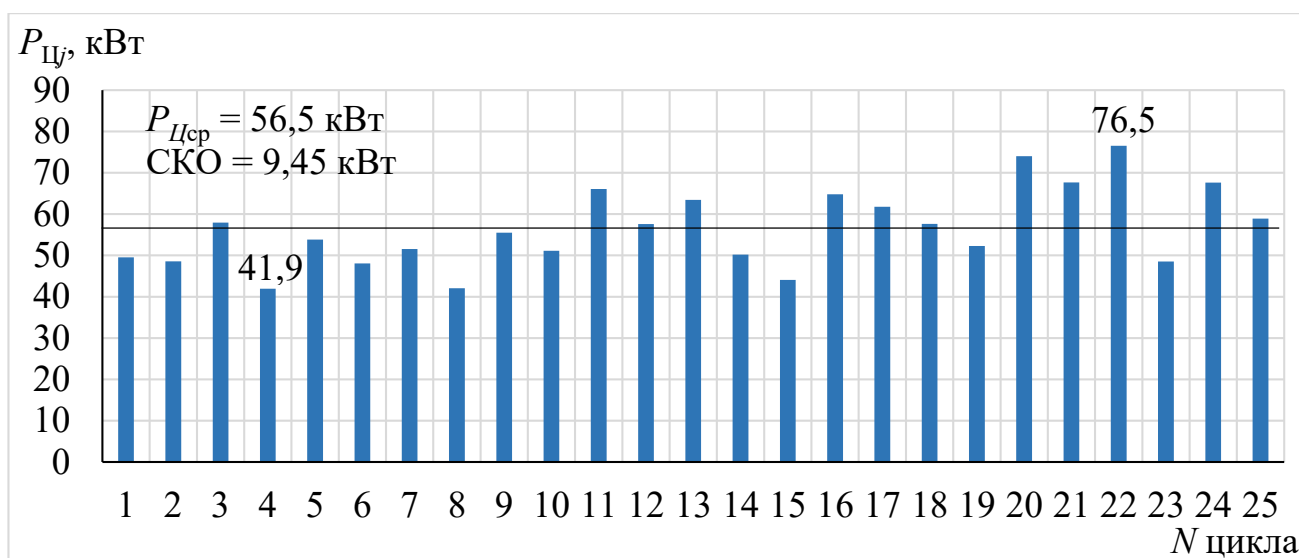


Рисунок 2.6 – Значения средней мощности $P_{Цj}$ за j -й цикл разрушения забоя

Как видно из рисунка 2.6, разброс используемой мощности электродвигателя ИО при разрушении забоя составляет от 41,9 кВт до 76,5 кВт. Среднее значение мощности за цикл составляет 56,5 кВт, $\sigma = 9,45$ кВт.

На рисунке 2.7 представлена гистограмма значений теоретической производительности проходческого комбайна, определенная для каждого цикла по (2.4).

Как видно из рисунка 2.7, теоретическая производительность ПК колеблется от 0,147 до 0,304 м³/мин, то есть в 2 раза. Среднее значение составляет 0,227 м³/мин при $\sigma = 0,05$ м³/мин.

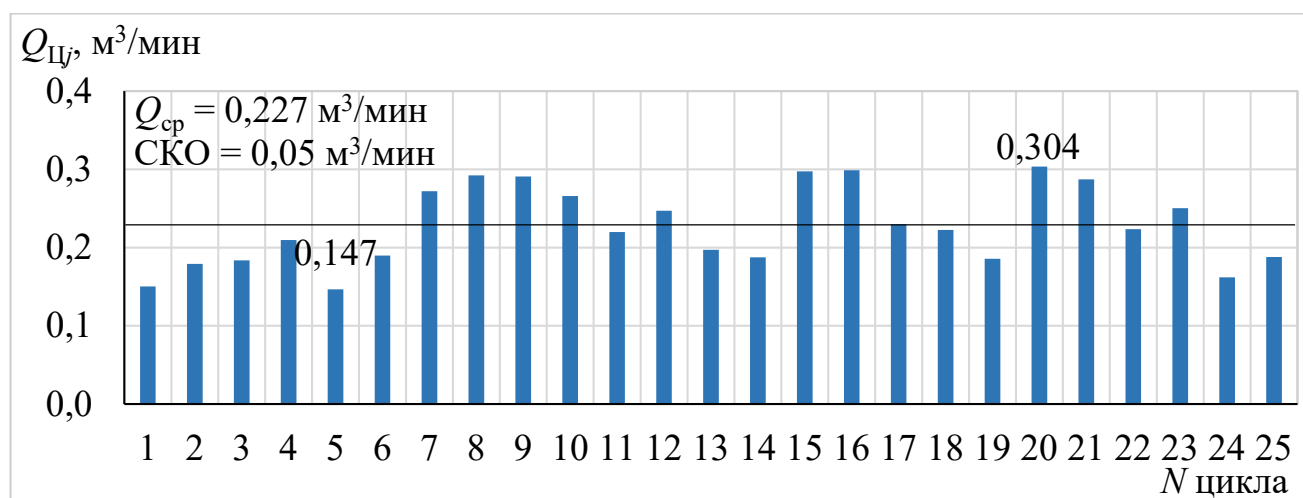


Рисунок 2.7 – Гистограмма распределения значений теоретической производительности проходческого комбайна КСП-35

Полученные с использованием выражения (2.5) значения удельных энергозатрат на разрушение забоя $W_{Цj}$ для j -того цикла представлены на гистограмме (рисунок 2.8).

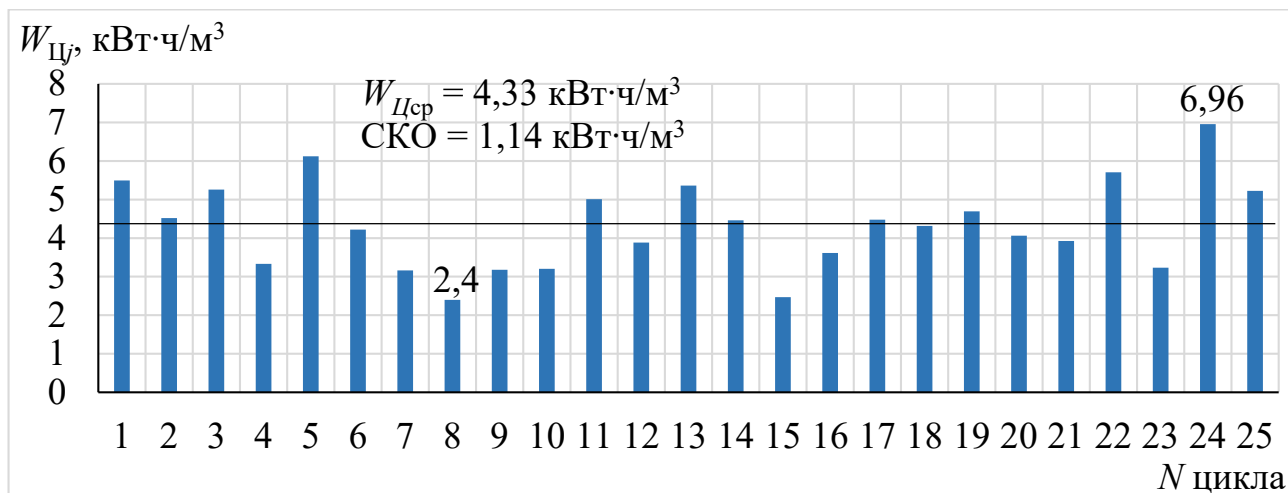


Рисунок 2.8 – Удельные энергозатраты на разрушение массива проходческим комбайном КСП-35

Среднее значение энергозатрат за цикл в соответствии с рисунком 2.8 составляет $4,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, минимальное значение составляет $2,4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, а максимальное – $6,96 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, то есть различие составляет в 2,5 раза при $\sigma = 1,14 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$. Как видно из гистограммы, колебание значений удельных энергозатрат на цикл обработки забоя значительно. Данный разбег значений также свидетельствует о недостаточно эффективном управлении машиной.

Для выборок значений за цикл удельных энергозатрат $W_{Ц}$, теоретической производительности $Q_{Ц}$, мощности $P_{Ц}$ и времени цикла $T_{Ц}$ определены средние арифметические значения и оценка стандартного отклонения на основании несмещенной оценки дисперсии. Полученные значения \bar{M} , $D(x)$ и σ , а также стандартной ошибки среднего $SE_{\bar{x}}$ сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Определение диапазона случайной величины

Параметр	\bar{M}	$D(x)$	σ	$SE_{\bar{x}}$	$\bar{M} - 2\sigma$	$\bar{M} + 2\sigma$
$W_{Ц}$, кВт·ч/м ³	4,33	1,29	1,14	0,227	2,05	6,61
$Q_{Ц}$, м ³ /мин	0,227	0,003	0,050	0,010	0,130	0,330
$P_{Ц}$, кВт	56,45	89,33	9,45	1,89	37,55	75,35
$T_{Ц}$, мин	26,88	37,81	6,15	1,23	14,58	39,18

В соответствии с паспортом проходческий комбайн КСП-35 обладает производительностью не менее 0,7 м³/мин при $\sigma_{сж} = 60$ МПа и не менее 0,45 м³/мин при $\sigma_{сж} = 80$ МПа. На рисунке 2.9 представлено поле значений производительности процесса разрушения забоя в зависимости от удельных энергозатрат и мощности двигателя на разрушение забоя, полученных с использованием (2.4).

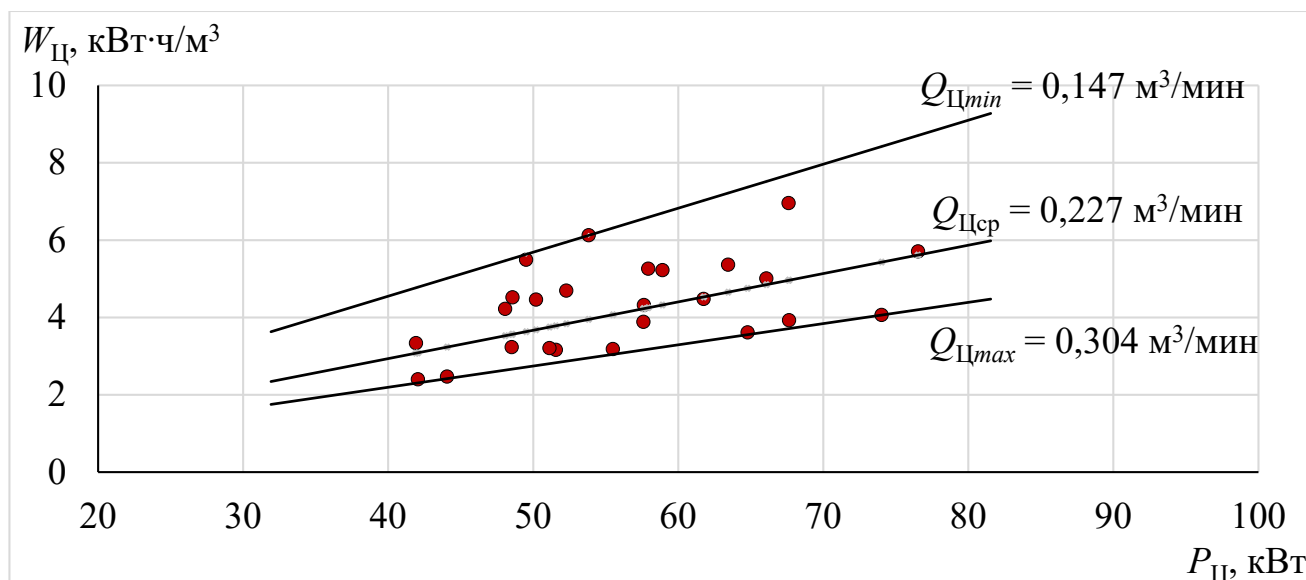


Рисунок 2.9 – Значения производительности процесса разрушения забоя за цикл

Как видно из рисунка 2.9, большинство значений теоретической производительности за цикл $Q_{Ц}$ (14 из 25, или 56%) попадает в область, характеризующуюся высокими энергозатратами и теоретической производительностью ниже средней из-за неэффективного режима разрушения забоя при неполном использовании мощности электродвигателя. Шесть значений теоретической производительности за цикл приближаются к максимуму $Q_{Цmax} = 0,304$ м³/мин при данных условиях проведения работ.

Удельные энергозатраты характеризуют эффективность процесса разрушения забоя с учетом крепости разрушаемой породы, структуры забоя, конструкции исполнительного органа и конструкции режущего инструмента, а также режимных параметров (скорости подачи, резания, глубины зарубки и шага фрезерования исполнительного органа) [114] и перебора породы по контуру выработки. Проходческий комбайн КСП-35 имеет местный и дистанционный режимы управления. Однако эффективность обработки забоя зависит в большей мере от умений оператора. При прочих неизменных условиях от цикла к циклу, таких как: крепость и наслоение пород в забое, площадь выработки, схема обработки забоя в течение смены или от цикла к циклу наблюдается изменение параметров, характеризующих эффективность работы проходческого комбайна – производительности за цикл, используемой мощности и энергозатрат на разрушение забоя.

При анализе полученных результатов в разделе 2 данной работы необходимо выделить циклы №№ 8, 9, 15, 16, 20, 21, при которых наблюдаются значения производительности проходческого комбайна, приближающиеся к максимуму по выборке, при минимизации энергозатрат. При этом наблюдаются минимальные значения времени цикла. При этом в циклах №№1, 3, 5, 13, 14, 24, 25 наблюдается абсолютно противоположная картина. Отличие отдельных циклов из общей выборки с определенной периодичностью явно указывает на влияние человеческого фактора при разрушении забоя, в частности при позиционировании проходческого комбайна относительно продольной оси выработки. Наилучшие результаты относятся к циклам с наименьшим смещением относительно продольной оси выработки. Циклы 16, 20, 21 соответствуют смещению комбайна КСП-35 относительно продольной оси выработки в пределах коридора $\pm 0,05$ м. В таблице 2.3 приведены значения производительности, удельных энергозатрат, мощности на разрушение и времени цикла для наилучших и наихудших показателей эффективности работы проходческого комбайна за цикл при минимальном и максимальном смещении комбайна относительно продольной оси выработки.

Таблица 2.3 – Наилучшие и наихудшие циклы по показателям эффективности разрушения забоя

№ цикла	$Q_{ц}$, м ³ /мин	$W_{ц}$, кВт·ч/м ³	$P_{ц}$, кВт	$T_{ц}$, мин
16	0,299	3,61	64,8	19,5
20	0,304	4,06	74,0	19,2
21	0,287	3,93	67,7	20,3
1	0,150	5,49	49,5	38,7
5	0,147	6,12	53,8	39,7
24	0,162	6,96	67,6	35,9
Среднее значение по выборке	0,227	4,33	58,8	26,9

Одним из путей обеспечения стабильно минимальных значений удельных энергозатрат является применение мехатронного подхода при проектировании проходческого комбайна. Анализируя целый ряд параметров, автоматизированная система управления позволяет подобрать оптимальный алгоритм воздействий на исполнительный орган для максимального использования мощности электродвигателя и достижения максимальной производительности при минимальных энергозатратах. Применение автоматизированной системы управления ПК с соответствующим набором датчиков и гибким алгоритмом управляющих воздействий, учитывающего также схему обработки забоя, особенности конструкции, схемы управления и инерционность гидравлики, позволит выйти на рациональные параметры режима разрушения забоя и максимально использовать мощность двигателя.

2.4 Выводы по разделу 2

1. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна вследствие погрешностей ручного управления. Большинство значений теоретической

производительности за цикл (56%) попадает в область, характеризующуюся высокими энергозатратами и теоретической производительностью ниже средней из-за неэффективного режима разрушения забоя при неполном использовании мощности электродвигателя. В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, перебор породы по контуру выработки, недостаточное использование мощности привода, что приводит к существенному снижению производительности и ресурса комбайна.

2. С вероятностью 95,4% значения удельных энергозатрат, теоретической производительности, мощности на разрушение и времени цикла находятся в диапазоне $W_{\text{ц}} = 4,33 \pm 2,28$ кВт·ч/м³, $Q_{\text{ц}} = 0,23 \pm 0,10$ м³/мин, $P_{\text{ц}} = 56,45 \pm 18,90$ кВт, $T_{\text{ц}} = 26,9 \pm 12,30$ мин.

3. Изменение эффективности работы проходческого комбайна от цикла к циклу при прочих неизменных параметрах вызвано ошибками оператора при позиционировании машины в выработке, что вызывает неравномерность характеристик рабочего процесса. Повышение эффективности проходческого комбайна может быть реализовано на основе мехатронного подхода при проектировании машины, который бы стал симбиозом интеллектуальной системы управления и эффективной силовой части и позволил бы реализовать необходимую точность позиционирования комбайна в выработке. Необходимо понизить степень зависимости эффективности обработки забоя от субъективного участия оператора в выработке корректирующих и управляющих воздействий на основе опыта, обученности или визуальной оценки ситуации.

Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научной работе соискателя [83, с. 34-40].

РАЗДЕЛ 3

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ОСЕВУЮ КОРОНКУ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МАССИВА

При прохождении подготовительных выработок механизированным способом при помощи проходческого комбайна правильность позиционирования машины в выработке во многом зависит от оператора. Смещение проходческого комбайна от продольной оси выработки в ту или иную сторону обуславливает изменение глубины зарубки в процессе горизонтального реза, увеличение переборов породы, что приводит к изменению спектра нагрузок на исполнительном органе и, как следствие, к снижению ресурса и производительности.

Это вызывает необходимость анализа режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна, оснащенного осевой коронкой, в ручном режиме управления и разработки математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке при ее взаимодействии с горным массивом в режиме послойного разрушения горизонтальными резами и смещении комбайна относительно продольной оси выработки. Математическая модель необходима для выполнения на ее основе теоретических исследований по установлению закономерностей влияния смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на показатели эффективности его работы – производительность, удельные энергозатраты и ресурс элементов трансмиссии.

3.1 Режимы работы исполнительного органа и схема разрушения забоя

На рисунке 3.1 приведена схема последовательной обработки забоя и технологические режимы работы коронки, которыми оснащен проходческий комбайн типа КСП-35. Экспериментальные исследования нагрузочных

характеристик двигателя привода исполнительного органа (раздел 2) проведены для такой типовой схемы, наиболее широко применяемой, поэтому другие схемы обработки забоя, как то: обработка вертикальными полосами, обработка с двух заходов, обработка по спирали в данной работе не рассматриваются.

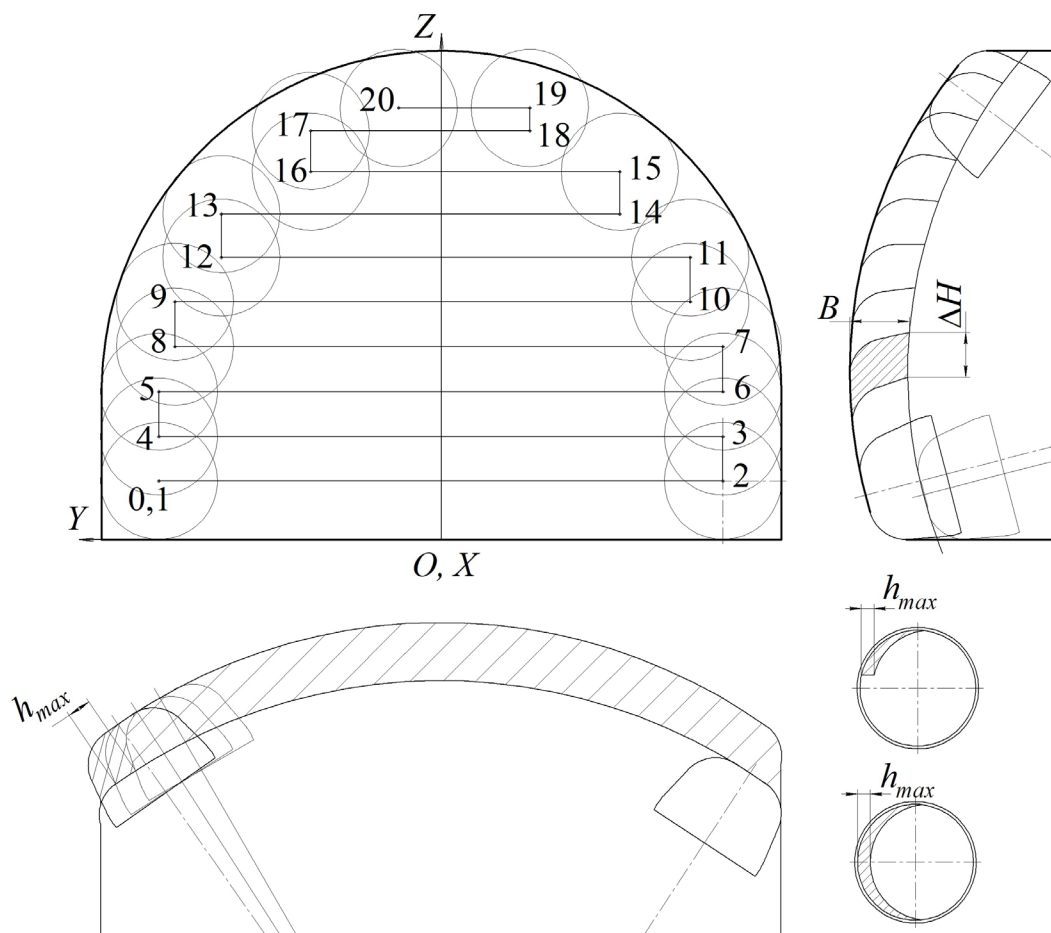


Рисунок 3.1 – Типовая схема последовательной обработки забоя горизонтальными резами

Последовательная обработка забоя характеризуется последовательным снятием горизонтальных полос в каждом цикле обработки. Анализ схемы, представленной на рисунке 3.1, показывает, что полный цикл обработки забоя арочной формы включает до 20 последовательных операций в следующих основных режимах:

- фронтальная зарубка (0-1);
- вертикальная зарубка (2-3, 4-5, 6-7; 8-9; 10-11; 12-13; 14-15; 16-17; 18-19);
- боковой рез (1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12; 13-14; 15-16; 17-18; 19-20).

Последовательность технологических операций между циклами обработки забоя включает передвижку комбайна, возведение крепи, установку анкерной крепи, доставку материалов, вспомогательные операции и регламентный перерыв.

Процесс разрушения забоя как при вертикальной зарубке вверх/вниз, так и при горизонтальном резе характеризуется серповидной формой среза. Максимальный размер стружки h_{max} (рисунок 3.1) определяется скоростью подачи исполнительного органа V_n , скоростью вращения коронки ω , схемой набора резцов, шагом фрезерования ΔH и текущей глубиной зарубки B коронки.

Учитывая характер движения стрелы по дуге при боковом резе, отклонение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки изменяет форму забоя, как показано на рисунке 4.1, смещает максимум текущей глубины зарубки в сторону отклонения, вносит перепад между значениями текущей глубины зарубки на краях выработки и, соответственно, влияет на параметры режима разрушения во время горизонтального реза.

3.2 Математическая модель разрушаемого массива и поверхности забоя

Математическая модель разрушаемого массива используется для учета влияния структуры пласта на формирование вектора внешнего возмущения.

Принятые допущения согласно работе [64, с. 43]:

- угольные и породные прослойки залегают под одним углом параллельно друг другу;
- сопротивляемость разрушению и мощность прослойка неизменны в пределах массива.

Формализация разрушаемого массива и поверхности забоя. Расчетная схема для разработки ММ разрушаемого массива представлена на рисунке 3.2. На рисунке показано сечение проходческого забоя, состоящего из трех прослоек с углом падения α_n . Система координат $OXYZ$ жестко связана с забоем. H_1 и H_2 – расстояние вдоль оси OZ до верхней границы соответствующего прослойка.

Исходными данными для расчета являются координаты текущего резца (X_i, Y_i, Z_i) в системе координат забоя $OXYZ$.

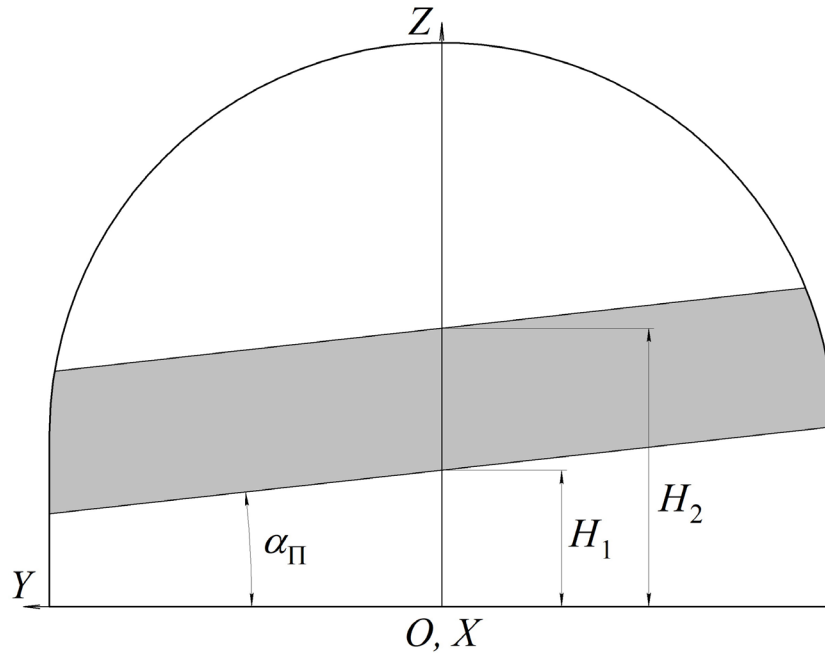


Рисунок 3.2 – Расчетная схема для разработки ММ разрушаемого массива

Математическая модель определения текущего номера прослойка:

$$\begin{cases} l = \overline{1, N_{\pi}} \\ \text{Если } Z_i < H_l - Y_i \operatorname{tg} \alpha_{\pi}, \\ \text{то } m_i = l, l = N_{\pi} \end{cases} \quad (3.1)$$

где l – номер прослойка;

N_{π} - количество разрушаемых прослойков;

H_l - расстояние от почвы выработки до верхней поверхности l -го прослойка вдоль оси OZ ;

m_i – номер, прослойка массива, разрушаемого i -м резцом.

В интегрируемом виде математическая модель разрушаемого массива запишется:

$$m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M), \quad (3.2)$$

где \bar{F}_M – вектор-функция определения прослойка массива, разрушаемого i -м резцом;

$\bar{X}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ – входной вектор, составляющими которого являются координаты вершины резца разрушающего забой;

$\bar{P}_M\{N_p, \alpha_p, H_l, fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi}), l = \overline{1, N_p}\}$ – вектор параметров структуры и зависимостей определения составляющих сил резания разрушаемого массива, компонентами которого являются:

$fz_l(\bar{Y}_{pi}), fy_l(\bar{Y}_{pi}), fx_l(\bar{Y}_{pi})$ – зависимости для определения составляющих сил резания, подачи и бокового усилия при разрушении l -го прослойка;

$\bar{Y}_{pi}\{\bar{V}_p, \bar{V}_n, h_i, t_i\}$ – вектор параметров процесса разрушения массива i -ым резцом;

$\bar{V}_p\{V_{py_i}, V_{pz_i}\}$ – скорость резания на i -м резце;

$\bar{V}_n\{V_{ny_i}, V_{nz_i}\}$ – скорость подачи на i -м резце.

Определение координат резца в системе координат выработки. Для определения координат вершины i -того резца коронки проходческого комбайна в неподвижной системе координат выработки $OXYZ$ составлена расчетная схема, представленная на рисунке 3.3.

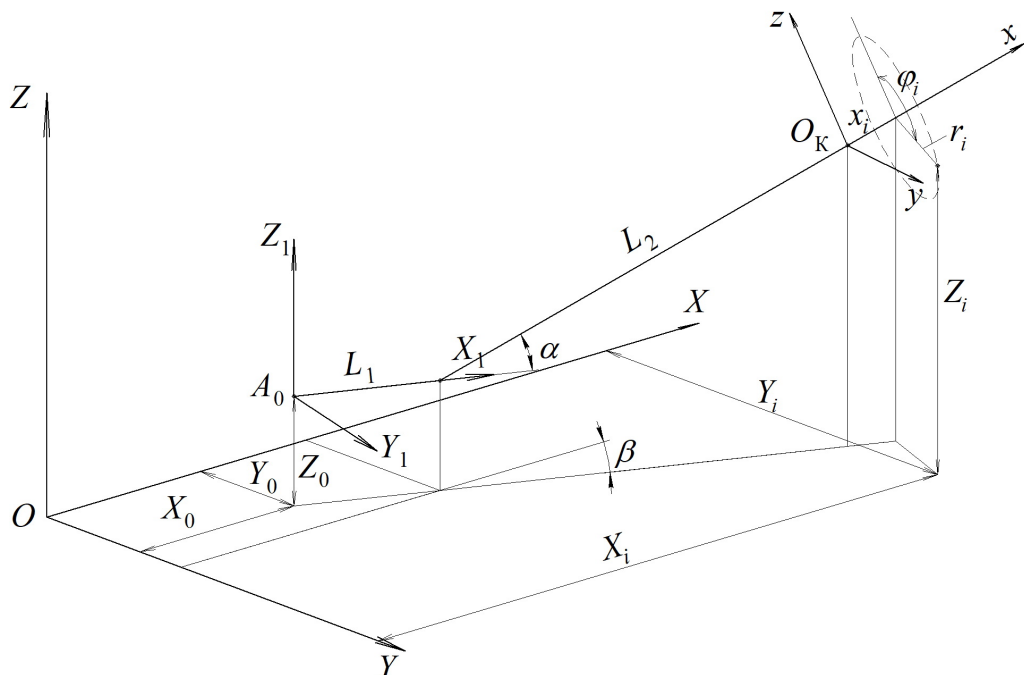


Рисунок 3.3 – Расчетная схема для определения координат вершины резца в забое

На рисунке 3.3 показано положение исполнительного органа в неподвижной системе координат $OXYZ$, жестко связанной с забоем, при его повороте в горизонтальной плоскости относительно оси, проходящей через точку A_0 на угол β и подъеме стрелы длиной L_2 в вертикальной плоскости на угол α (L_1 - расстояние между осями поворота стрелы в горизонтальной и вертикальной плоскостях). Система координат O_{kxyz} , жестко связана со стрелой, горизонтальная ось которой O_{kx} направлена вдоль оси стрелы и совпадает с осью вращения коронки. Ось O_{kz} совпадает по направлению с осью OZ при нулевом угле подъема стрелы $\alpha = 0$. Точка O_k находится в основании коронки. Положение резца в системе координат O_{kxyz} задано его параметрами в схеме набора: радиусом установки r_i , углом поворота φ_i и смещением вдоль оси коронки x_i .

Математическая модель определения координат вершины резца в ЛСК, согласно расчетной схемы, приведенной на рисунке 3.3, запишется:

$$\begin{cases} X_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta \\ Y_{1i} = (L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha + r_i \sin \varphi_i) \cos \beta, \\ Z_{1i} = (L_2 + x_i) \sin \alpha + r_i \cos \varphi_i \cos \alpha \end{cases} \quad (3.3)$$

где X_0, Y_0, Z_0 - координаты точки A_0 поворота стрелы в горизонтальной плоскости в неподвижной системе $OXYZ$.

Для определения координат i -го резца (X_i, Y_i, Z_i) в неподвижной системе координат выработки после передвижки комбайна необходимо ввести матрицу направляющих косинусов, определяющих комбинацию последовательных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат:

$$(X_i, Y_i, Z_i) = R \cdot \begin{bmatrix} X_{1i} \\ Y_{1i} \\ Z_{1i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{0x} + \Delta X \\ A_{0y} + \Delta Y \\ A_{0z} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

где $R = R_Z(\varphi) \cdot R_X(\theta) \cdot R_Z(\psi)$ – матрица направляющих косинусов;

ΔY – смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после передвижки;

ΔX – передвижка комбайна вдоль оси выработки.

Координата Y_0 точки A_0 соответствует боковому смещению проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после предыдущей передвижки. При повороте корпуса комбайна в горизонтальной плоскости относительно оси Z изменяются координаты точки A_0 в системе координат $OXYZ$ на величину ΔX и ΔY , угол $\Delta\beta$ добавляется к углу β с учетом знака.

В интегрированном виде математическая модель определения координат вершины резца в забое запишется в виде:

$$\bar{X}_i = \bar{F}_{\text{пр}}(\bar{X}_{\text{пр}}, \bar{P}_{\text{сп}}), \quad (3.5)$$

где $\bar{F}_{\text{пр}}$ – вектор функции определения координат положения резца в пространстве забоя;

$\bar{X}_{\text{пр}}(L_2, \alpha, \beta, x_i, \varphi_i, r_i)$ – входной вектор компонентами которого являются длина стрелы L_2 и параметры ее положения (α, β) , а также параметры вершины резца (r_i, φ_i, x_i) в системе $O_{\text{кхуз}}$;

$\bar{P}_{\text{сп}}\{L_1, X_0, Y_0, Z_0\}$ – вектор параметров системы подвески рабочего органа;

$L_{\text{ст}}$ – длина стрелы в сложенном положении (минимальная длина стрелы).

Математическая модель оценки условия контактирования резца с массивом. Форма забоя задается совокупностью поверхностей, образованных телами вращения с радиусом длины стрелы ИО и сечением частично повторяющим форму коронки (см. рисунок 3.4).

Шаг подъема стрелы $\Delta\alpha$ связан с шагом фрезерования следующей зависимостью:

$$\Delta\alpha_j = \arccos\left(\frac{2L_2^2 - \Delta H^2}{2L_2}\right) \quad (3.6)$$

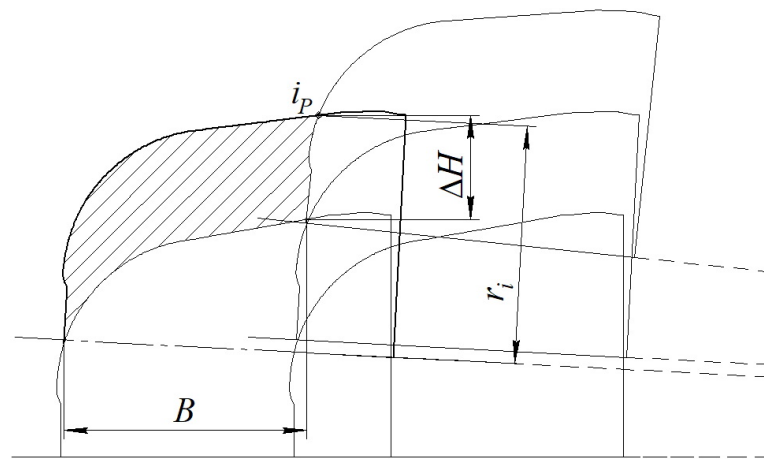


Рисунок 3.4 – Задание поверхности забоя

На рисунке 3.4 приняты следующие обозначения: r_i – радиус линии резания i -го резца.

Наряду с параметрами разрушаемого массива на величину и характер изменения нагрузок, действующих на исполнительный орган при его взаимодействии с разрушаемым массивом, определяющее влияние также оказывают величина и форма обрабатываемого сечения. Эти характеристики определяют количество резцов одновременно участвующих в разрушении массива, начало и длительность формирования нагрузки на каждом резце. Поэтому необходимо составить математическую модель оценки контактирования резца с разрушаемым массивом с учетом поверхности забоя, образованной предшествующими горизонтальными резами:

- после зарубки вверх;
- после зарубки вниз.

На рисунке 3.5 представлена разработанная расчетная схема для определения контакта резца с забоем в режиме горизонтального реза.

На рисунке 3.5 приняты следующие обозначения:

M_p – разрушенная часть массива предыдущим проходом;

M – массив, подлежащий разрушению;

1-2 и 3-4 – отрезки расположения центров окружностей, ограничивающих боковую поверхность (куток забоя) разрушенного массива после бокового реза;

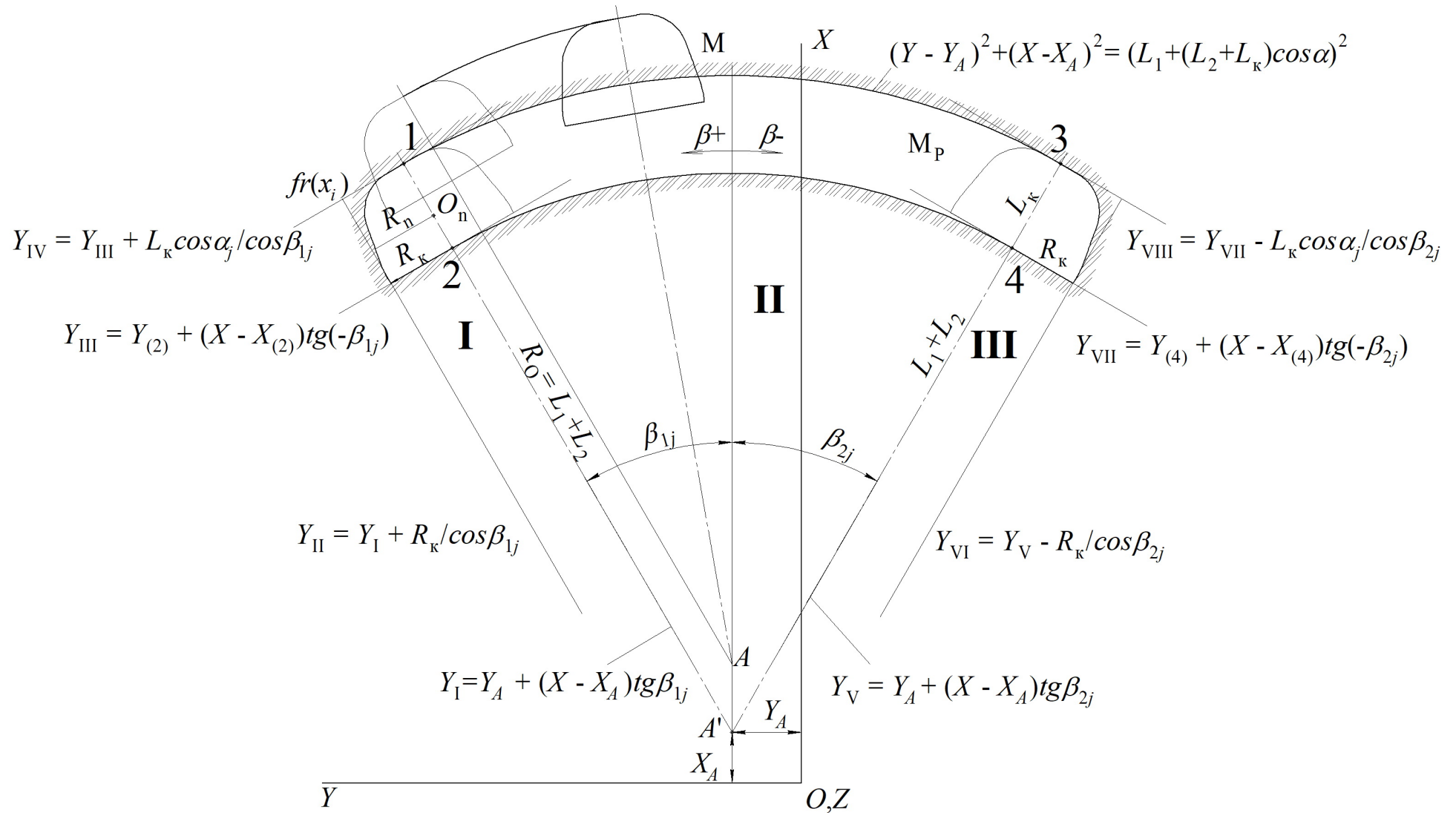


Рисунок 3.5 – Расчетная схема для определения контакта резца с забоем

B_i , O_n и R_n – соответственно положение вершины резца, центр и радиус окружности ограничивающей поверхность забоя для этого резца после n -го бокового реза;

L_k – длина коронки ПК по оси вращения;

β_{1j} , β_{2j} и α_j – углы предельного положения стрелы в горизонтальной плоскости и угол ее подъема при реализации j -го бокового реза.

Сечение тела вращения ИО при прохождении горизонтального реза частично повторяет форму коронки, как показано на рисунке 3.6 (заштрихованные области). Как видно из рисунка 3.6, при фрезеровании ИО проходческого комбайна формирует горизонтальными резами в плоскости XOZ ограничивающую дугу радиусом $(L_2 + L_k)$ в секторе доступном стреле по оси Z .

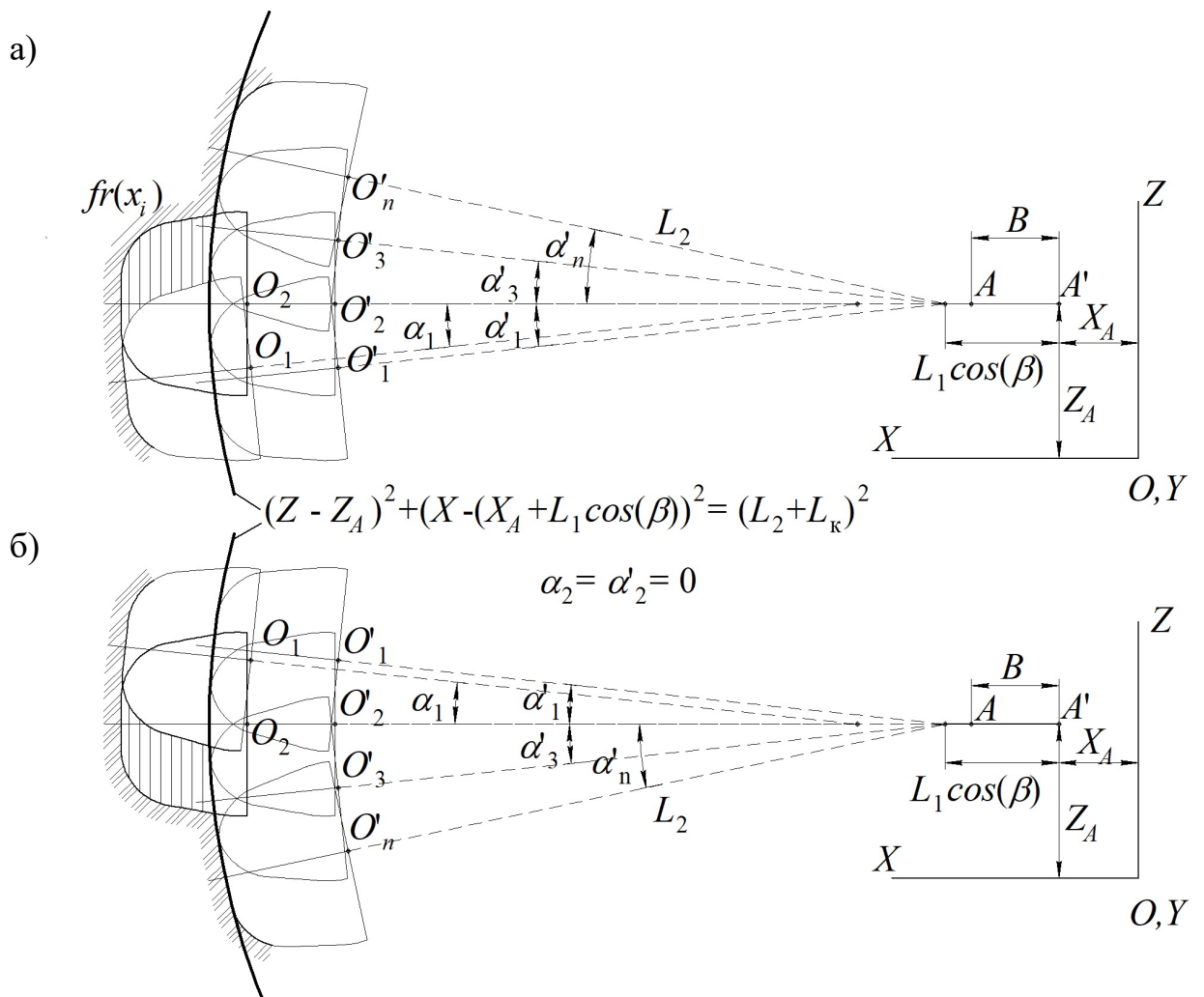


Рисунок 3.6 – Параметры задания поверхности забоя при боковом резе после зарубки вверх (а) и после зарубки вниз (б) (последовательная схема обработки)

На рисунке 3.6 приняты следующие обозначения:

$\alpha_1, \alpha_2 (\alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_n)$ - угол подъема стрелы для j -го реза в рассматриваемом (предшествующем) цикле разрушения;

$A_0, (A)$ - положение оси поворотной турели в рассматриваемом (предшествующем) цикле обработки забоя;

$O_1, O_2 (O'_1, O'_2, O'_3, O'_n)$ - положения начала координат O_{KXUZ} в рассматриваемом (предшествующем) цикле при последовательной схеме обработки забоя.

Для оценки контактирования резца с забоем ограничивающая поверхность выработанного массива аппроксимируется поверхностями, образованными телами вращения при прохождении исполнительным органом проходческого комбайна горизонтальных резов с соответствующими углами подъема и поворота стрелы. В общем случае число таких поверхностей составляет n .

Расстояние от вершины резца до поверхностей, ограничивающих форму забоя, должно быть больше их радиусов. Иначе резец попадет в выработанное пространство M_p . Ограничивающее неравенство поверхности сферы в общем виде может быть записано следующим образом:

$$(X_i + X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \geq R^2 \quad (3.7)$$

где (X_0, Y_0, Z_0) – координаты центра ограничивающей сферической поверхности радиусом R .

В плоской задаче для плоскостей XOZ и XOY неравенство (3.6) может быть переписано как неравенство (3.7) для ограничивающей окружности:

$$(X_i + X_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 \geq R^2 \quad (3.8)$$

$$(X_i + X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 \geq R^2 \quad (3.9)$$

Образующая формы коронки задается в плоскостях xO_{KZ} и xO_{KY} локальной системы координат O_{KXUZ} коронки сочетанием параметров для каждой линии резания (x_i, r_i) . При этом в плоскости xO_{KZ} $r_i = z_i$, в плоскости xO_{KY} $r_i = y_i$. Пересчет

координат резца в плоскости XOZ и XOY производится по зависимостям (3.3, 3.4) для каждого j -го прохода. В координатах плоскостей XOZ и XOY форма коронки может быть представлена на ограниченном отрезке X_0-X_n кусочно-линейной функцией следующего вида:

$$Z_k(X) = \begin{cases} \frac{(X - X_{i-1})(Z_i - Z_{i-1})}{(X_i - X_{i-1})} + Z_{i-1}, \\ \text{для } i \in [2, n], X_{i-1} \leq X < X_i \end{cases}, \quad (3.10)$$

$$Y_k(X) = \begin{cases} \frac{(X - X_{i-1})(Y_i - Y_{i-1})}{(X_i - X_{i-1})} + Y_{i-1}. \\ \text{для } i \in [2, n], X_{i-1} \leq X < X_i, \end{cases} \quad (3.11)$$

Для режима работы исполнительного органа с углом подъема стрелы в начальный момент α_0 , при известных параметрах схемы обработки забоя ($\Delta H, B$) углы подъема стрелы α_j для определения центров ограничивающих забой окружностей определяются по зависимостям (3.12) для последовательной схемы обработки забоя.

$$\begin{cases} \alpha'_2 = \alpha_2 = \alpha_0 \\ \alpha'_1 = \alpha_1 = \arcsin\left(\sin \alpha_0 - \frac{\Delta H}{L_{\text{СТ}}}\right), X'_{A1} = X_0 - B, X_{A1} = X_0 \\ \alpha'_3 = \alpha_3 = \arcsin\left(\sin \alpha_0 + \frac{\Delta H}{L_{\text{СТ}}}\right), X'_{A3} = X_0 - B, X_{A3} = X_0 \end{cases} \quad (3.12)$$

С учетом ограничений на основании расчетных схем (рисунок 3.5, 3.6) составлена математическая модель (3.13) определения логического состояния (0, 1) признака контактирования i -го резца при j -м горизонтальном проходе с разрушаемым массивом.

$$\left. \begin{array}{l}
 j = \overline{1, n} \\
 \text{Сектор II:} \\
 Y_I = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}; Y_V = Y_A + (X_{ij} - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}; \\
 \text{если } (Y_V \leq Y_{ij} \leq Y_I), \text{ то} \\
 \left\{ \beta = \operatorname{arctg} \left((Y_{ij} - Y_A) / (X_{ij} - X_A) \right); R_1 = L_2 + L_K; \right. \\
 \alpha = \operatorname{arcsin} \left(\frac{Z_{ij}}{L_2 + L_K} \right); R_2 = L_1 + (L_2 + L_K) \cos \alpha; \\
 Z_K(X_{ij}) = \begin{cases} \frac{(X_{ij} - X_{(k-1, j-1)})(Z_{(k, j-1)} - Z_{(k-1, j-1)})}{(X_{(k, j-1)} - X_{(k-1, j-1)})} + Z_{(k-1, j-1)} \\ \text{для } k \in [2, n], X_{(k-1, j-1)} \leq X_{ij} < X_{(k, j-1)} \end{cases} \\
 \text{go to M1; } \} \\
 \text{Сектор I:} \\
 Y_{II} = Y_I + R_K / \cos \beta_{1j}; Y_{III} = Y_{(2)} + (X_{ij} - X_{(2)}) \operatorname{tg}(-\beta_{1j}); \\
 Y_{IV} = Y_{III} + L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{1j}; \\
 \text{если } (Y_{II} < Y_i < Y_{III}) \wedge (Y_{III} < Y_i < Y_{IV}), \text{ то} \\
 \left\{ x_R = ((X_i - X_{(2)}) / \cos \beta_{1j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{1j}) \sin \beta_{1j}) / \cos \alpha_j; \right. \quad (3.13) \\
 X_{(2)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{1j}; Y_{(2)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{1j}; \\
 X_{O_j} = X_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{1j}; Y_{O_j} = Y_{(2)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{1j}; R = Y_K(x_R); \\
 Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; \text{ go to M2; } \} \\
 \text{Сектор III:} \\
 Y_{VI} = Y_V - R_K / \cos \beta_{2j}; Y_{VII} = Y_{(4)} + (X_{ij} - X_{(4)}) \operatorname{tg}(-\beta_{2j}); \\
 Y_{VIII} = Y_{VII} - L_K \cos \alpha_j / \cos \beta_{2j}; \\
 \text{если } (Y_{VI} < Y_i < Y_V) \wedge (Y_{VIII} < Y_i < Y_{VII}), \text{ то} \\
 \left\{ x_R = ((X_i - X_{(4)}) / \cos \beta_{2j} + (Y_i - Y_A - (X_i - X_A) \operatorname{tg} \beta_{2j}) \sin \beta_{2j}) / \cos \alpha_j; \right. \\
 X_{(4)} = X_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \cos \beta_{2j}; Y_{(4)} = Y_A + (L_1 + L_2 \cos \alpha_j) \sin \beta_{2j}; \\
 X_{O_j} = X_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \cos \beta_{2j}; Y_{O_j} = Y_{(4)} + x_R \cos \alpha_j \sin \beta_{2j}; R = Y_K(x_R); \\
 Z_{O_j} = Z_A + (L_2 + x_R) \sin \alpha_j; \text{ go to M2; } \} \\
 \text{M1: Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2 \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2 \\ Z_{ij} \geq Z_K(X_{ij}) \end{cases} \\
 \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n \\
 \text{M2: Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2 \\
 \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n
 \end{array} \right\}$$

Значения углов поворота стрелы в горизонтальной плоскости β_{1n}, β_{2n} (см. рисунок 3.5) определяются шириной выработки с учетом ее формы и угла подъема стрелы α_j по зависимостям (3.14):

$$\begin{cases} \alpha_0 = \arcsin \frac{H - H_0}{L_{\text{ст}}}; \\ \beta_{1n} = \arcsin \left(\frac{B_{1n}}{L_{\text{ст}} \cos \alpha_n + L_0} \right) - \beta_n; \\ \beta_{2n} = \arcsin \left(\frac{B_{2n}}{L_{\text{ст}} \cos \alpha_n + L_0} \right) - \beta_n; \\ \beta_n = \arcsin \left(\frac{y_0}{L_{\text{ст}} \cos \alpha_n + L_0} \right). \end{cases} \quad (3.14)$$

где $B_{1n}(B_{2n})$ – расстояние от продольной оси комбайна до левой (правой) боковой стенки выработки на высоте работы исполнительного органа, соответствующей углу подъема стрелы α_j .

Математическая модель определения величины a - признака контактирования резца с разрушаемым массивом как интегрированного ФЗЭ запишется:

$$a = \bar{F}_{\text{кр}}(\bar{X}_i, \bar{P}_{\text{кр}}), \quad (3.15)$$

где a – величина признака контактирования резца с разрушаемым массивом (при $a = 1$ – резец контактирует с забоем и $a = 0$ – резец не контактирует);

$\bar{F}_{\text{кр}}$ - вектор-функция определения величины признака контактирования резца с массивом;

$\bar{P}_{\text{кр}}(L_{\text{ст}}, R_0, R_k, fr(x), N_n, \beta_{1n}, \beta_{2n}, \alpha_n, X_{An}, Y_{An}, Z_{An}, n = \overline{1, N_n})$ – вектор параметров для оценки условия контактирования резца с массивом.

Зависимости (3.2) и (3.4) являются математической моделью разрушаемого массива, а зависимости (3.5)...(3.15) - математические модели оценки условия контактирования резца с массивом позволяющие определять номер прослойка разрушаемого i -ым резцом по известному его положению в пространстве забоя. Модели (3.2)...(3.15) использованы при разработке математической модели

вектора внешнего возмущения, формируемого при работе исполнительного органа оснащенного осевыми коронками.

3.3 Математическая модель определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки

Резцовый исполнительный орган разрушает забой резцами в определенной последовательности, в результате чего образуется схема стружкообразования, определяющая параметры среза – толщину стружки h_i и шаг резания t_i - на каждом резце, контактирующем с забоем. Для их определения необходимо знать траектории движения резцов, образующих забой для рассматриваемого i -го резца (всего n_p резцов на коронке).

На рисунке 3.7 представлена схема набора резцов для коронки исполнительного органа проходческого комбайна. Начало координат находится в основании коронки, ось OX совпадает с ее продольной осью. Координаты r_i и φ_i находятся в смещенной плоскости относительно OZY на величину x_i . Угол φ_i отсчитывается от оси Z .

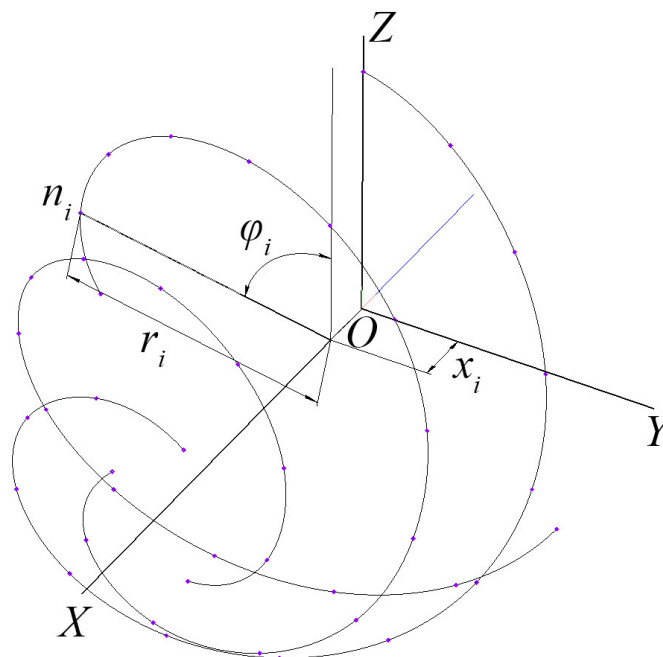


Рисунок 3.7 – К схеме набора резцов коронки ПК

Параметры схемы набора описывают геометрию коронки и содержат следующую информацию для каждого i -го резца:

φ_i – угол установки i -го резца на коронке, рад;

r_i, x_i – расстояния от вершины i -го резца до оси вращения и до торца коронки;

Для разработки математической модели определения толщины и ширины среза для осевой коронки в процессе разрушения массива, были приняты следующие исходные положения:

– толщина среза резца определяется как расстояние до поверхности разрушаемого массива, формируемой резцами опережающей лопасти в сечении забоя плоскостью, проходящей через вершину резца и ось вращения коронки;

– ширина среза резца определяется как расстояние между вершиной резца и вершиной опережающего резца (находящегося на соседних линиях резания) в сечении забоя плоскостью проходящей через его вершину и ось вращения коронки.

С учетом этих принятых положений была разработана расчетная схема для определения параметров среза – толщины и ширины – на каждом резце (см. рисунок 3.8).

На схеме показаны:

$OXYZ$ – неподвижная система координат, жестко связанная с забоем;

$OX'Y'Z'$ – неподвижная система координат, совпадающая с положением системы $OXYZ$ при ее повороте вокруг оси OZ на угол поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

O_{kxyz} – система координат жестко связанная с осью вращения коронки, оси которой параллельны осям системы координат $OX'Y'Z'$;

$A-A$ – сечение забоя, в рассматриваемой момент времени, плоскостью, проходящей через вершину i -го резца и ось вращения коронки;

O_{krx} – система координат, задающая положение i -го резца и резцов формирующих поверхность забоя в сечении $A-A$ и определяющих его параметры среза;

L_i – лопасть коронки, на которой установлен i -й и опережающий резец в соседней линии резания;

L'_i – опережающая лопасть, на которой установлены резцы, формирующие поверхность забоя для i -го резца в сечении A-A;

a_0 и a_0' , b_0' – положения вершины опережающего резца и резцов, формирующих поверхность забоя для этого резца в опережающей лопасти в рассматриваемый момент времени;

a и a' , b' – положения вершин резцов, формирующих поверхность забоя для i -го резца в сечении A-A;

r_i , R_{1i} , R_{2i} , R_{3i} и x_i , X_{1i} , X_{2i} , X_{3i} – координаты вершин i -го резца и резцов формирующих поверхность забоя в сечении A-A;

h_i , t_i и δ_i – толщина, ширина среза i -го резца и угол наклона поверхности забоя к оси or в сечении A-A;

φ_i , φ_{ki} , $\Delta\varphi_p$ и $\Delta\varphi_l$ – угол положения i -го резца, угол i -го поворота коронки, разность углов установки соседних резцов лопасти и угол сдвига лопастей коронки соответственно;

$fr(x)$ и $\psi(r)$ – зависимости для задания боковой поверхности коронки и углов смещения резцов на лопастях;

α и β – угол подъема стрелы и ее поворота в горизонтальной плоскости в рассматриваемый момент времени;

ω_k , ω_β – соответственно, угловые скорости вращения коронки и поворота стрелы в горизонтальной плоскости;

V_p и V_{Xi}, V_{Yi}, V_{Zi} – скорость резания и составляющие скорости подачи i -го резца в системе координат $OXYZ$, в рассматриваемый момент времени. С учетом расчетной схемы (рисунок 3.8) математическая модель определения параметров реза осевой коронки в режиме бокового реза может быть представлена в виде (3.16).

$$\begin{aligned}
& i \in [1, N-1] \\
& L_3 = L_1 + L_2 \cos \alpha; \omega_\beta = \frac{V_\pi}{60(L_1 + L_2)}; V_{\text{пр}} = \omega_\beta L_3; t_{\text{об}} = 60/\omega_\kappa; \\
& \text{для } \varphi_{i+1} < \varphi_i: \varphi_{i+1} = 2\pi + \varphi_{i+1}; \text{ для } \varphi'_i < \varphi_i: \varphi'_i = 2\pi + \varphi'_i; \\
& \Delta\varphi_p = \varphi_{i+1} - \varphi_i; \Delta\varphi_\pi = \varphi'_i - \varphi_i; \\
& t_{\text{стр}} = \begin{bmatrix} t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_p / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot \Delta\varphi_\pi / 2\pi \\ t_{\text{об}} \cdot (\Delta\varphi_p + \Delta\varphi_\pi) / 2\pi \end{bmatrix} \\
& k \in [1, 3] \\
& l_{\text{стр}ki} = V_{\text{пр}} \cdot t_{\text{стр}k}; \beta_{\text{стр}ki} = 180 \cdot l_{\text{стр}ki} / \pi \cdot L_3; \\
& R_{ki} = \sqrt{r_{ki}^2 - (L_3 \sin \beta_{\text{стр}ki} \cos \varphi_i)^2} - L_3 \sin \beta_{\text{стр}ki} \sin \varphi_i; \\
& X_{ki} = x_{ki} - \sqrt{2(L_3)^2 - 2L_3^2 \cos \beta_{\text{стр}k}} \sin \frac{\beta_{\text{стр}k}}{2}; \\
& t_i = \sqrt{(r_i + R_{1i})^2 + (X_i + X_{1i})^2}; \delta_i = \arccos \left(\frac{R_{2i} - R_{3i}}{\sqrt{(R_{2i} - R_{3i})^2 + (X_{2i} - X_{3i})^2}} \right); \\
& h_i = (r_i - R_{3i}) \sin \delta_i + (x_i - X_{3i}) \cos \delta_i; S = h_i \cdot t_i; \\
& \begin{bmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \\ V_{Z_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta \\ ((L_1 + (L_2 + x_i) \cos \alpha) \cos \beta) \cdot \omega_\beta \cdot \sin \beta + r_i \omega_\kappa \cos \varphi_i \\ -r_i \omega_\kappa \sin \varphi_i \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.16}$$

В интегрированном виде математическая модель определения параметров процесса разрушения массива аксиальной коронкой как ФЗЭ запишется:

$$\bar{Y}_p = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})), \tag{3.17}$$

где $\bar{Y}_p = (h_i, t_i, V_{X_i}, V_{Y_i}, V_{Z_i}, i = \overline{1, N_l})$ – выходной вектор параметров процесса разрушения массива резами лопасти аксиальной коронки;

\bar{F}_p – вектор-функция определения параметров процесса разрушения массива резами лопасти аксиальной коронки;

$\bar{X}_p(\bar{Y}_{\text{сн}}, \bar{R})$ – входной вектор, компонентами которого являются схема набора коронки $\bar{Y}_{\text{сн}}$ и вектор параметров режима ее работы $\bar{R}(L_1, \alpha, \beta, \omega_\kappa, V_\pi, \omega_\beta)$;

Зависимости (3.16), (3.17) являются математическими моделями определения параметров процесса разрушения массива резцами осевой коронки. Модель может быть использована для определения составляющих силы резания на резцах лопасти коронки, а также составляющих вектора внешнего возмущения.

3.4 Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке как функционально законченный элемент

Путем объединения приведенных в пп. 3.1-3.3 зависимостей можно составить комплексную модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_i = \bar{F}_M(\bar{X}_i(X_i, Y_i, Z_i), \bar{P}_M) \\ \bar{X}_i = \bar{F}_{пр}(\bar{X}_{пр}, \bar{P}_{сп}) \\ \text{Условие контакта резца:} \\ \text{Если } \begin{cases} (X_{ij} - (X_A + L_1 \cos \beta))^2 + (Z_{ij} - Z_A)^2 \geq R_1^2 \\ (X_{ij} - X_A)^2 + (Y_{ij} - Y_A)^2 \geq R_2^2 \\ Z_{ij} \geq Z_k(X_{ij}) \end{cases} \\ \text{Если } (X_{ij} - X_{O_j})^2 + (Y_{ij} - Y_{O_j})^2 + (Z_{ij} - Z_{O_j})^2 \geq R^2 \\ \text{то } a = 1, j = j + 1, \text{ иначе } a = 0, j = n \\ a = \bar{F}_{кр}(\bar{X}_i, \bar{P}_{кр}) \\ \{h_i, t_i\} = \bar{F}_p(\bar{X}_p(\bar{Y}_{сн}, \bar{R})) \\ \{Z_i, Y_i\} = F_1(P_{zi}, P_{yi}, \bar{r}_i) \\ \{\bar{P}_M, \bar{M}_M\} = F_2(Z_i, Y_i) \end{array} \right. \quad (3.18)$$

где $F_{пр}()$ – вектор-функция расчета положения резца;

$F_1()$ – вектор-функция расчета мгновенных значений усилия на резце;

$F_2()$ – вектор-функция расчета вектора внешнего возмущения на коронке.

Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке в интегрированном виде может быть записана:

$$\bar{Y} = f(\bar{X}, \bar{P}), \quad (3.19)$$

где $\bar{Y} = \{\bar{M}_{м.1}, \bar{P}_M, M\}$ – вектор выходных параметров;

$\bar{X} = \{(C_1), \bar{r}_M, \bar{\omega}_{м.1}, \bar{V}_M, \varphi, \omega\}$ – вектор входных параметров;

$\bar{P} = \{\bar{P}_{CH}, \bar{P}_3, \bar{P}_{yc}, \bar{P}_{CT}\}$ – вектор параметров ФЗЭ,

$\bar{P}_{CH} = \{\bar{\varphi}_{0i}, \bar{x}_i, \bar{r}_i, \bar{l}_{ti}, \bar{l}_{hi}, \bar{l}_{thi}, n_p\}$ – параметры схемы набора;

$\bar{P}_3 = (\alpha_j, \bar{r}_{обрj}, L_1, L_2, R_T)$ – параметры, задающие забой.

$\bar{P}_{yc} = (p_k, \bar{P}_{P_z}(), \bar{P}_{P_y}())$ – параметры зависимости усилий на резце от режима

резания;

$\bar{P}_{P_z}(), \bar{P}_{P_y}()$ – векторы параметров, входящих в формулы расчета усилий

резания и подачи;

p_k – контактная прочность породы;

$\bar{P}_{CT} = \{r_{к.1}, (C_{2-1})\}$ – вектор параметров, задающих положение коронки на стреле.

3.5 Оценка адекватности математической модели

Адекватность математической модели оценивалась путем сравнения интегральных показателей, отражающих эффективность процесса разрушения горного массива, а именно: средней мощности на разрушение за цикл, теоретической производительности, удельных энергозатрат за цикл, длительности обработки забоя.

При проведении математического моделирования послойного разрушения забойного пространства принимались следующие допущения:

- исполнительный орган проходческого комбайна движется строго по заданной траектории без учета переборов в связи с тем, что при определении теоретической производительности в ходе обработки экспериментальных данных площадь выработки принималась по паспорту выработки;

- крепость породы и угля не изменяется в пределах прослойка и соответствует принятым значениям, указанным на рисунке 2.2.

Расчетные значения показателей эффективности работы проходческого комбайна за цикл обработки забоя определены на основе разработанной математической модели при следующих исходных данных, соответствующих условиям шахтного эксперимента:

Глубина зарубки B , м	0,325;
Шаг фрезерования ΔH , м	0,4;
Контактная прочность прослоек	
p_k , МПа (снизу вверх)	570; 65; 320; 570;
Площадь выработки S , м ²	17,8;
Номинальная мощность двигателя ИО, кВт	132;
Смещение ПК относительно продольной оси, мм	0.

Методика обработки результатов математического моделирования приведена в подразделе 4.1.

В качестве исходных данных для сравнения с результатами моделирования принимались экспериментальные данные, соответствующие циклу разрушения забоя со смещением комбайна в пределах коридора $\pm 0,05$ м (циклы 16, 20 и 21, см. подраздел 2.3).

В таблице 3.1 приведены показатели эффективности, полученные в результате моделирования для указанных выше условий и соответствующие средние показатели по циклам 16, 20 и 21, соответствующие нулевому смещению проходческого комбайна относительно продольной оси выработки полученные в результате обработки данных шахтного эксперимента.

Таблица 3.1 – Сравнение показателей эффективности работы проходческого комбайна при математическом моделировании и шахтном эксперименте

Параметр	Данные шахтного эксперимента	Данные математического моделирования	Отклонение результатов, %
P , кВт	68,8	79,0	14,8
Q , м ³ /мин	0,297	0,314	5,7
W , кВт·ч/м ³	3,9	4,2	7,7
$T_{ц}$, мин	19,6	20,9	6,6

Таким образом, расхождение результатов математического моделирования и экспериментальных данных не превышают $\pm 15\%$, что подтверждает адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке. Разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом с осевой коронкой проходческого комбайна и влияние на показатели эффективности его работы.

3.6 Выводы по разделу 3

1. Разработана комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, которая состоит из моделей разрушаемого массива и поверхности забоя, определения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом, определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки для определения усилий резания и подачи на резце с учетом выполнения условия контакта резца с забоем. Отличие представленной математической модели от ранее разработанных заключается в учете смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после передвижки между циклами обработки забоя.

2. Впервые разработана математическая модель оценки условия контактирования резца осевой коронки с массивом в вертикальной и горизонтальной плоскости в режиме горизонтального реза с разбивкой на три сектора контроля, учитывающая проведение предыдущего реза в том же цикле и соответствующие проходы исполнительного органа в предыдущих циклах. Выходными данными математической модели является двоичное логическое состояние признака контактирования каждого резца с горным массивом в текущем резе при текущем положении коронки.

3. Установлена адекватность разработанной математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна. Максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при математическом моделировании и шахтном эксперименте не превысило $\pm 15\%$. Разработанная математическая модель может быть использована для выполнения теоретических исследований по установлению закономерностей влияния позиционирования проходческого комбайна на показатели эффективности его работы.

Рассматриваемые в разделе вопросы опубликованы в научной работе [115] и доложены соискателем на международной научно-технической конференции [116].

РАЗДЕЛ 4**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА КСП-35 В ПРОХОДЧЕСКОМ ЗАБОЕ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

При прохождении подготовительных выработок механизированным способом при помощи проходческого комбайна точность позиционирования машины в выработке относительно ее продольной оси во многом зависит от оператора, и отклонение от оси выработки в ту или иную сторону может привести к изменению формы проходческого забоя и, как следствие, к изменению основных показателей работы комбайна – производительности, энергоэффективности, неравномерности нагрузки на исполнительный орган в процессе разрушения и в итоге – на ресурс элементов привода ИО.

Проведение имитационного моделирования с использованием разработанной в п. 3 математической модели формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке позволит выявить наиболее неблагоприятное сочетание факторов при обработке проходческого забоя – сечения выработки, шага фрезерования и бокового смещения и оценить степень влияния позиционирования проходческого комбайна в выработке при послойном разрушении забоя на производительность, энергоэффективность и ресурс отдельных силовых систем.

Результаты моделирования позволят обосновать допустимые границы коридора, в пределах которого позиционирование проходческого комбайна в выработке будет иметь минимальное влияние на показатели эффективности его работы и на уменьшение ресурса элементов трансмиссии.

Обеспечение точности позиционирования проходческого комбайна в пределах заданного коридора относительно продольной оси выработки и сохранение выбранного направления требует разработки метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки с учетом случайного характера установки арок крепи и погрешности измерения расстояния до стоек.

Проведение исследования влияния количества и погрешности измерений на формирование корректирующего воздействия позволит обосновать требуемую точность измерительных устройств и количество проводимых измерений, и это позволит решить поставленную задачу по обоснованию структуры и параметров позиционирования проходческого комбайна КСП-35 и коронки его исполнительного органа в выработке.

4.1 Исследование влияния точности позиционирования проходческого комбайна в выработке на показатели эффективности его работы и ресурс отдельных элементов трансмиссии

Объект исследования, условия проведения имитационного моделирования, планирование имитационного моделирования. Объектом исследования является проходческий комбайн избирательного действия типа КСП-35 с осевой коронкой диаметром 1050 мм с двигателем привода исполнительного органа мощностью 132 кВт. Краткие технические характеристики проходческого комбайна КСП-35 представлены в п. 2.1.

Для оценки влияния позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в выработке на его основные показатели – производительность, энергоэффективность, ресурс элементов трансмиссии исполнительного органа и его силовых систем используется разработанная модель рабочего процесса проходческого комбайна (раздел 3), позволяющая определять силовую нагруженность исполнительного органа, объем разрушенной горной массы и длительность рабочего процесса обработки забоя.

Согласно опыту эксплуатации проходческих комбайнов, наиболее низкий ресурс имеют элементы трансмиссии привода ИО. Момент сопротивления на коронке, обусловленный случайным характером процесса разрушения, меняющимся количеством контактирующих резцов и изменяющейся нагрузкой на каждый резец при вращении коронки, приводит к усталости металла вследствие накопления повреждений под действием переменных напряжений. Поэтому для

оценки изменения ресурса отдельных элементов трансмиссии в данном исследовании используется крутящий момент на коронке исполнительного органа и накопленная повреждаемость.

Полученные в результате моделирования значения крутящего момента на коронке позволяют определить мощность электродвигателя, затрачиваемую на разрушение забоя. Для оценки теоретической производительности используется объем разрушаемой породы и модельное время обработки забоя.

При моделировании момента внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа принята схема набора резцов коронки комбайна КСП-35. Параметры схемы набора r_i , x_i , φ_i для каждого резца приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Схема набора резцов коронки

N резца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
r_i , мм	164	239	307	365	413	447	465	476	487	498	510	520	525	521
x_i , мм	717	704	675	632	577	511	443	378	319	254	192	131	65	0
φ_i , град.	17	324	284	250	220	193	169	145	121	96	72	48	24	0
N резца	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
r_i , мм	139	216	286	347	399	437	461	473	484	495	506	517	523	522
x_i , мм	718	710	686	648	596	535	466	401	338	275	212	151	88	21
φ_i , град.	156	97	55	20	350	323	297	273	249	225	200	176	152	128
N резца	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
r_i , мм	115	192	264	328	384	425	455	469	480	491	502	513	521	525
x_i , мм	709	715	696	662	614	557	489	422	360	297	233	171	110	42
φ_i , град.	295	233	186	148	117	90	65	41	17	353	329	305	280	256

Основными факторами, влияющими на характеристики рабочего процесса, являются физико-механические свойства породы, определяющиеся крепостью породных прослоек, режимные параметры: скорость подачи, частота вращения коронки, параметры разрушения забоя: шаг фрезерования, глубина зарубки, а также сечение разрушаемого забоя. Фактор смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки на сегодняшний момент до конца не изучен и требует оценки степени его влияния на эффективность разрушения забоя.

Учитывая, что схема набора резцов при данном математическом моделировании является неизменной и угловая скорость вращения коронки в

линейке проходческих комбайнов КСП не регулируется, принят перечень изменяемых в процессе моделирования параметров:

- смещение относительно продольной оси выработки Y_0 , м;
- контактная прочность породы p_k , МПа;
- шаг фрезерования ΔH , м;
- сечение выработки S , м².

Значение глубины зарубки B по центру выработки, соответствующие шагу передвижки проходческого комбайна, принято равным 0,4 м. При изменении сечения выработки в соответствии с паспортом изменяется шаг установки арочной крепи с 0,5 м на 0,65 м, поэтому принято усредненное значение между меньшим полным 0,5 м и половинным 0,325 м шагом установки крепи.

Обоснование диапазона изменения параметров моделирования. При управлении передвижкой проходческого комбайна между циклами разрушения и его позиционировании в выработке оператор не имеет других ориентиров, кроме боковых стенок выработки, при этом забой может иметь смещение от предыдущего цикла обработки. Точность установки машины относительно продольной оси выработки зависит от опыта оператора и смещение носит зачастую случайный характер.

Согласно экспертным оценкам, величина смещения комбайна относительно продольной оси выработки может находиться в пределах $\pm 0,25$ м для выработки сечением до 20,1 м² при условии обеспечения обработки забоя с одной установки комбайна. В результате смещения проходческого комбайна влево и вправо от оси выработки происходит существенное изменение текущей глубины зарубки в процессе проведения горизонтального реза, которая при повторном смещении на 0,25 м может находиться в пределах $B = 0,104-0,630$ м, то есть перепад может составлять до 6 раз.

В качестве примера на рисунке 4.1 представлена схема формирования стружки при разрушении проходческого забоя горизонтальными резами в следствие смещения комбайна относительно продольной оси выработки на величину Y_0 . На рисунке приняты следующие обозначения: Y_0 , Y'_0 – соответственно

отклонение предыдущего реза и текущее отклонение от продольной оси; точки A_0 и A'_0 соответствуют исходному положению вертикальной оси поворотной турели и положению после передвижки в системе координат $OXYZ$ выработки в соответствии с расчетной схемой определения координат вершины реза, представленной на рисунке 3.3; B_{max} , B_{min} – максимальная и минимальная глубина зарубки ИО в текущем горизонтальном резе с учетом смещения комбайна относительно продольной оси выработки.

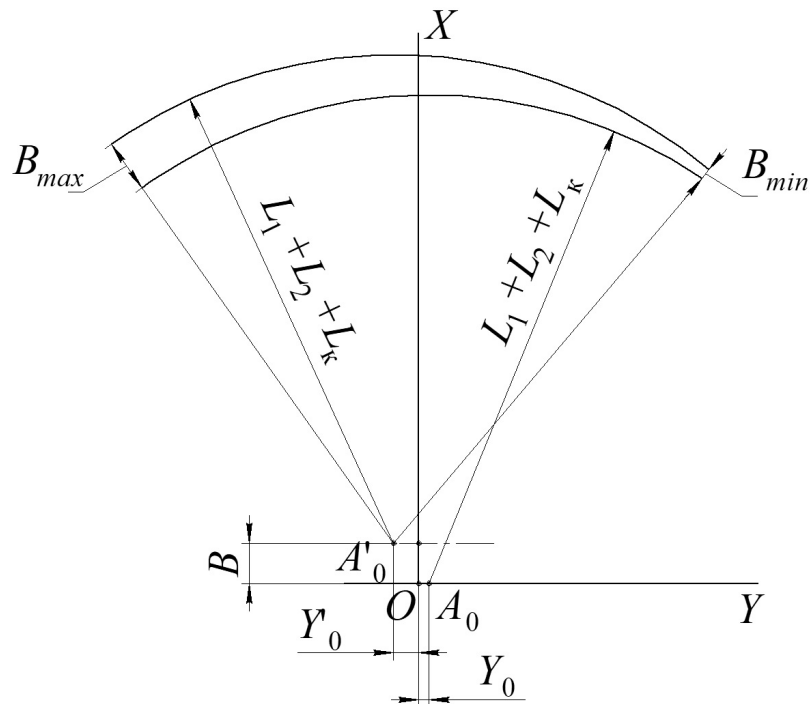


Рисунок 4.1 – Схема формирования стружки при разрушении проходческого забоя горизонтальными резами в следствии смещения комбайна относительно продольной оси выработки

Для перебора факторов смещения корпуса комбайна и выявления наиболее неблагоприятного сочетания смещений предложено последовательное моделирование разрушения забоя при отсутствии смещения в первом цикле, смещение влево на 0,1 м, 0,2 м и 0,25 м во втором цикле разрушения, смещение вправо из крайнего левого положения также с шагом 0,1 м, 0,2 м и 0,25 м.

Для подтверждения наибольшего влияния именно повторного смещения на основные показатели эффективности разрушения и на снижение ресурса основных

элементов трансмиссии, предложено сочетание максимального смещения влево $Y_0 = -0,25$ м во втором цикле и смещение без изменения в третьем цикле разрушения, то есть $\Delta Y = 0$ после передвижки (координаты $Y_0/Y'_0 = -250/-250$).

В соответствии с паспортными данными проходческого комбайна КСП-35 верхний предел контактной прочности породы p_k для данного диаметра коронки составляет 600 МПа. Значения параметра контактной прочности при модельном исследовании приняты соответствующими максимальному и среднему значению фактора.

Диапазон значений шага фрезерования ΔH составляет от 0 до 0,64 м. Максимальное значение шага фрезерования для данного диаметра коронки 1050 мм конструктивно ограничено 640 мм и определяется суммой максимального радиуса коронки по резцам R_k и минимального радиуса установки резца №29 (табл. 4.1). При моделировании приняты значения шага фрезерования $\Delta H = 0,2$ м и 0,4 м. Фрезерование с шагом менее 0,2 м не представляется целесообразным, так как увеличивает количество горизонтальных резов, время цикла и уменьшает теоретическую производительность за цикл, также это приводит к значительной неравномерности крутящего момента на коронке; шаг фрезерования более 0,4 м приводит к увеличению нагрузки на ИО, снижению скорости подачи, увеличению времени цикла и к снижению производительности ПК.

По данным ДонУГИ из 183 подготовительных выработок, проводимых и запланированных на шахтах ДНР в 2018-2028 гг., 146, или 79,8%, имеют сечение S от 13 м² до 20,1 м². При проведении математического моделирования приняты значения границ диапазона наиболее распространенных значений подготовительных выработок. При прохождении выработок меньшего сечения смещение машины не будет велико, так как ширина выработки позволяет оператору ориентироваться и позиционировать корпус комбайна относительно продольной оси, и влияние смещения на изменение текущей глубины зарубки коронки будет несущественно.

Диапазон изменения скорости подачи V_{II} исполнительного органа по данным завода-изготовителя составляет от 0 до 2,8 м/мин и ограничен конструктивными

параметрами комбайна. Значения скорости подачи при разрушении прослоек забоя определялись из условия максимальной возможной скорости подачи коронки при максимальном использовании мощности электродвигателя на разрушение забоя, при соответствующих значениях глубины зарубки и шага фрезерования.

С учетом вышеизложенного разработан план проведения имитационного моделирования и сформирован перечень изменяемых параметров моделирования (таблица 4.2). Математическое моделирование реализовано с перебором всех возможных вариантов сочетаний факторов. Выходными величинами являлись массивы мгновенных значений крутящего момента M на коронке и мощности привода исполнительного органа P , а также времени $t_{ц}$ и объема разрушенного горного массива $V_{ц}$ за полный цикл обработки забоя.

Таблица 4.2 – План имитационного моделирования

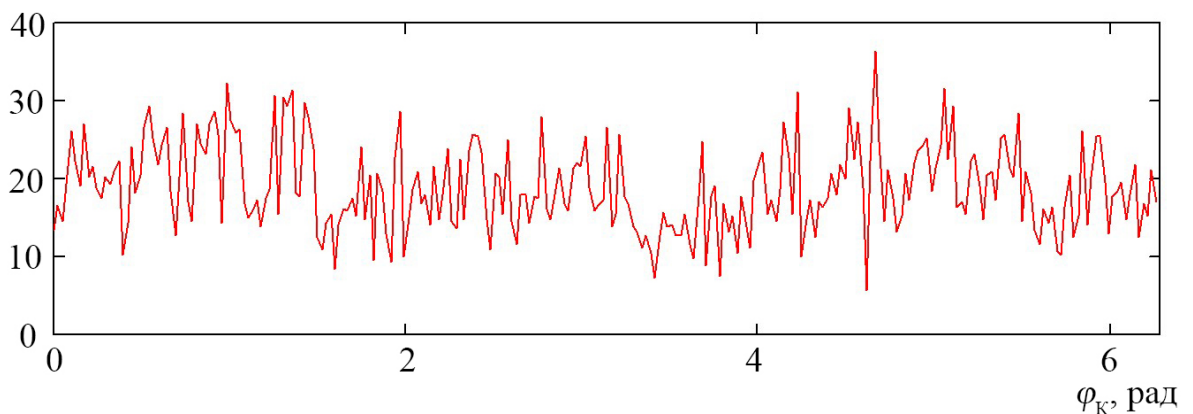
Наименование параметра	Значение		
Координата оси поворотной турели Y_0 , м до и после передвижки Y'_0 , м* (Y_0/ Y'_0) по рисунку 4.1	0/0	1	№ положения
	0/-0,10	2	
	0/-0,20	3	
	0/-0,25	4	
	-0,25/0,10	5	
	-0,25/0,20	6	
	-0,25/0,25	7	
	-0,25/-0,25	8	
Глубина зарубки B , м	0,4		
Шаг фрезерования ΔH , м	0,2; 0,4		
Контактная прочность породы p_k , МПа	320; 600		
Площадь выработки S , м ²	20,1; 13		
* - положительные значения означают сдвиг вправо, отрицательные - влево			

Методика обработки данных имитационного моделирования. В процессе моделирования, с учетом принятой схемы обработки, грудь забоя разрушалась горизонтальными резами с принятым шагом фрезерования. При этом каждый горизонтальный рез разбивался на малые равные сектора, в пределах которых глубина зарубки практически постоянна. Для каждого сектора смоделирован

рабочий процесс разрушения забоя. После этого значения момента на коронке, времени обработки и объема разрушенной породы объединялись для каждого прохода и формировался массив значений за цикл обработки забоя в целом.

В качестве примера на рисунке 4.2 а приведен фрагмент изменения момента сопротивления M на коронке в зависимости от угла ее поворота φ_k (участок сектора) и для полного цикла обработки забоя (рисунок 4.2 б) при следующих условиях разрушения: $B = 0,4$ м, $\Delta H = 0,4$ м, $S = 20,1$ м², $p_k = 320$ МПа, $Y_0/Y'_0 = 0/0$.

а) M , кНм



б)

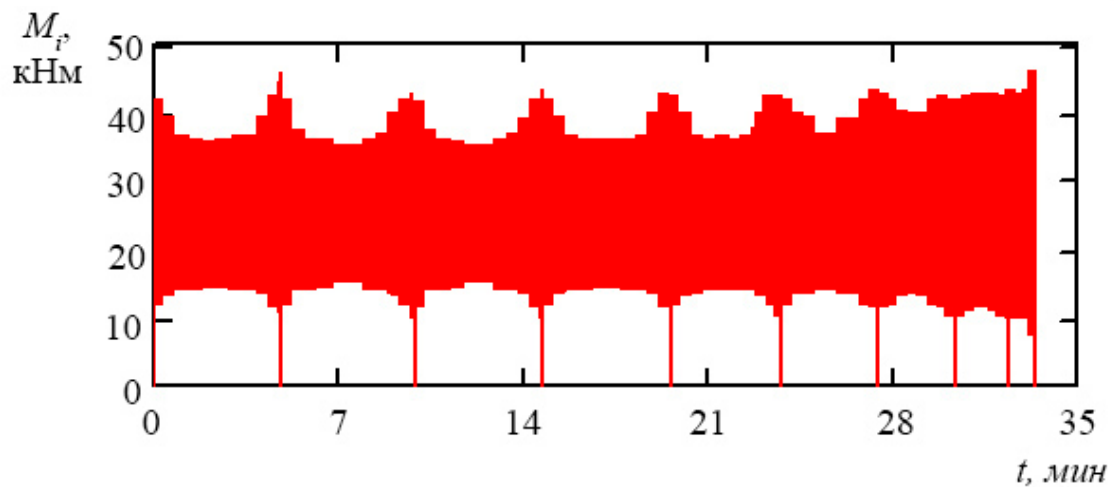


Рисунок 4.2 – Зависимость момента сопротивления M на коронке от угла поворота коронки φ_k (а) и за весь цикл обработки забоя от времени (б)

На рисунке 4.3 представлена блок-схема методики обработки полученных данных в результате имитационного моделирования. При обработке массивов данных момента сопротивления на коронке, мощности на разрушение и времени цикла для каждого сочетания факторов определяются показатели эффективности работы проходческого комбайна и их изменение в зависимости от смещения

относительно продольной оси выработки и оценка влияния смещения комбайна на изменение ресурса элементов трансмиссии.

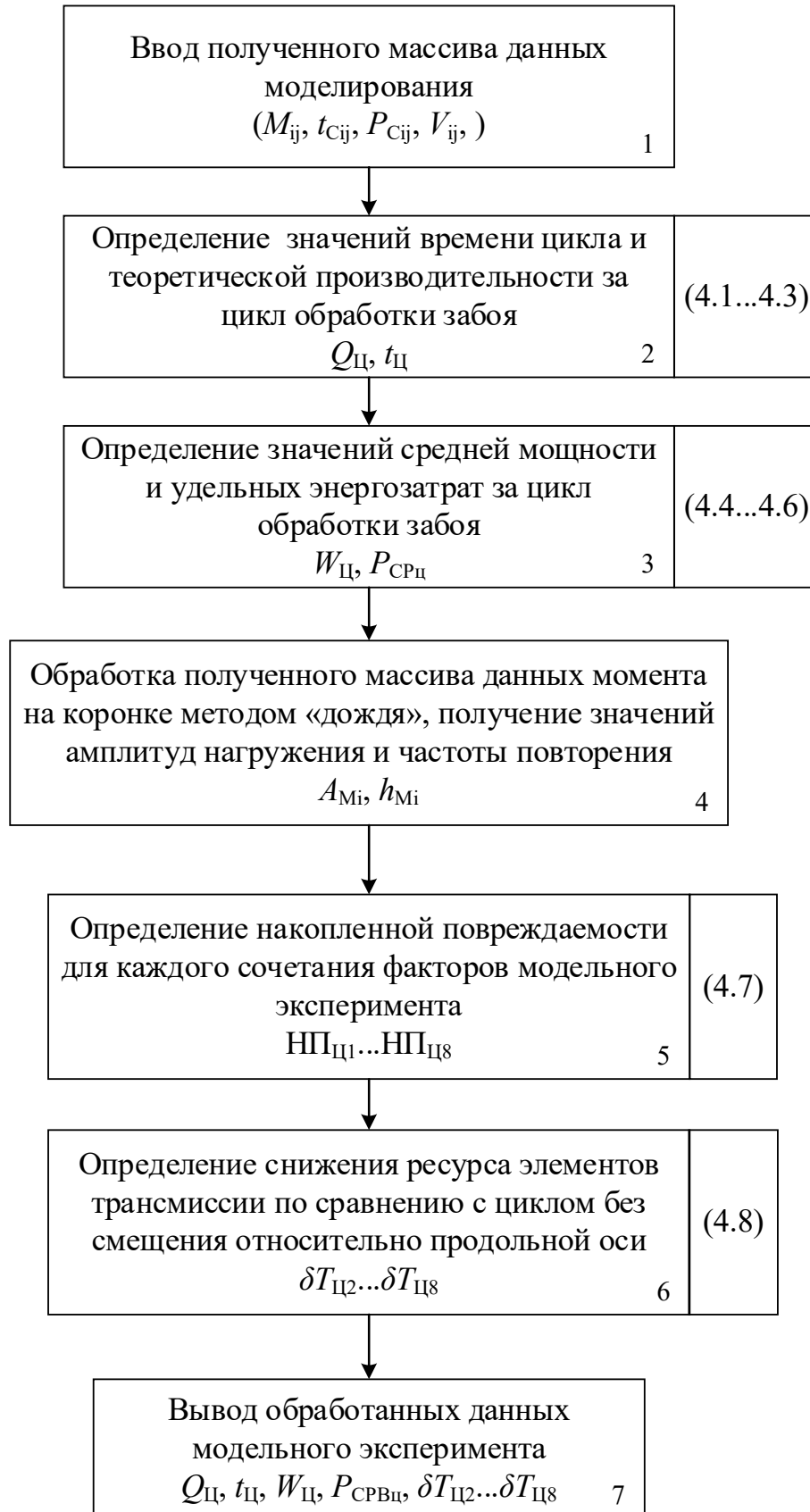


Рисунок 4.3 – Методика обработки данных имитационного моделирования

Время прохождения сектора t_{cij} , время цикла обработки забоя $t_{ц}$ и теоретическая производительность проходческого комбайна за цикл обработки забоя $Q_{ц}$ определялась по следующим зависимостям (блок 2 методики):

$$t_{cij} = L_{дij} / V_{псij} \quad (4.1)$$

$$t_{ц} = \sum_{i=1}^{n_{рез}} \sum_{j=1}^{m_c} t_{cij} \quad (4.2)$$

$$Q_{ц} = V_{ц} / t_{ц} \quad (4.3)$$

где $L_{д}$ – длина дуги, формируемая исполнительным органом при обработке сегмента, м;

$V_{пс}$ – средняя скорость подачи в сегменте, м/мин;

t_{cij} – время, необходимое для разрушения j -го сегмента в i -м резе, мин;

m_c – количество сегментов в резе;

$n_{рез}$ – количество горизонтальных резов в цикле разрушения забоя;

$t_{ц}$ – время, затрачиваемое комбайном на цикл разрушения забойного пространства, мин;

$V_{ц}$ – объем разрушаемой породы за цикл работы проходческого комбайна, м³.

Удельные энергозатраты $W_{ц}$ за цикл обработки забоя определялись по зависимостям (блок 3):

$$P_{срpi} = \frac{\sum_{j=1}^{m_c} (P_{cij} \cdot t_{cij})}{t_{pi}}, \quad (4.4)$$

$$P_{срц} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{рез}} P_{срpi} \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^n t_{pi}}, \quad (4.5)$$

$$W_{ц} = P_{срц} / Q_{ц}. \quad (4.6)$$

где $P_{срц}$ – средняя мощность на ИО за цикл разрушения, кВт;

$P_{ср\,pi}$ – средняя мощность в i -м резе, кВт;

$P_{сij}$ - мощность двигателя необходимая для разрушения j -го сектора в i -м резе, кВт;

$t_{pi} = \sum_{j=1}^{m_{рез}} t_{сij}$ – время затрачиваемое на i -тый рез при разрушении забойного пространства, мин.

В качестве количественной характеристики ресурса комбайна принималась накопленная повреждаемость (блок 5 рисунок 4.3). Накопленная повреждаемость НП₁ принята за базовое значение для сравнение. Накопленная повреждаемость НП для элементов трансмиссии может быть получена по формуле:

$$\text{НП} = \sum_{i=1}^n (A_{Mi})^m \cdot h_{Mi}, \quad (4.7)$$

где A_{Mi} , h_{Mi} – соответственно амплитуды нагружения и частота их повторения, рассчитанные по методу «дождя»;

m – показатель степени кривой усталости для рассматриваемого элемента. Значение показателя 3, 6 и 9, что соответствует расчетам на контактную прочность, кручение и изгиб.

Для обработки массивов момента нагружения элементов трансмиссии проходческого комбайна с целью получения амплитуды нагружения и частоты их повторения использован метод «дождя» [117, 118] (блок 4 рисунок 4.3). Для реализации метода «дождя» разработана программа, преобразующая массив значений момента нагружения за цикл обработки забоя в массив значений амплитуд нагружения. На рисунке 4.4 представлена блок-схема метода «дождя», отражающая последовательность обработки данных.

Суть метода заключается в том, что меньшие циклы рассматриваются как наложенные на плавный ход нагрузки в одном направлении. Для этого из всего массива значений моментов выделяются последовательно точки максимума и минимума момента, которые чередуются. Последовательным перебором по три точки по алгоритму метода «дождя» определяются закрытые петли нагружения и

определяются их амплитуды. Для определения частоты попадания амплитуд нагружения в заданный интервал весь массив значений разбит на 10 интервалов.

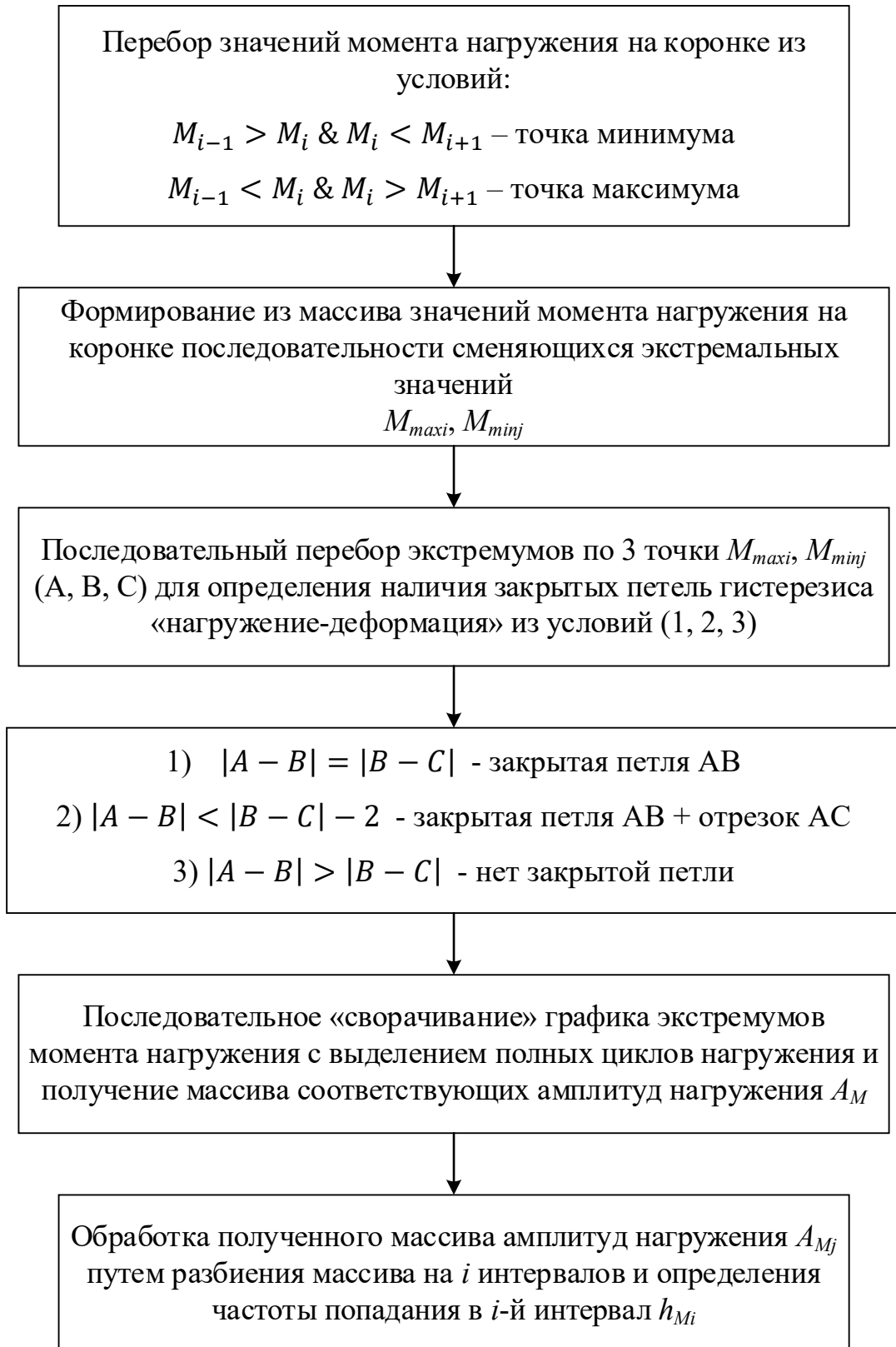


Рисунок 4.4 – Методика обработки массива моментов нагружения методом «дождя» для получения амплитуд нагружения и частот попадания в интервал

Изменение ресурса элементов трансмиссии δT определяется из зависимости:

$$\delta T_{\text{ср}i} = \frac{N^{<3>} \cdot \frac{\text{НП}_{\text{ц}1}}{\text{НП}_{\text{ц}i}} + N^{<6>} \cdot \frac{\text{НП}_{\text{ц}1}}{\text{НП}_{\text{ц}i}} + N^{<9>} \cdot \frac{\text{НП}_{\text{ц}1}}{\text{НП}_{\text{ц}i}}}{N^{<3>} + N^{<6>} + N^{<9>}}, \quad (4.8)$$

где $N^{<3>}$, $N^{<6>}$, $N^{<9>}$ – соответственно количество элементов трансмиссии ИО ПК, рассчитываемые на контактную прочность, кручение и изгиб;

$\text{НП}_{\text{ц}1}$ - накопленная повреждаемость за цикл обработки забоя для положения 1;

$\text{НП}'_{\text{ц}i}$ – накопленная повреждаемость за цикл обработки забоя для положений $i = 2 \dots 8$.

Влияние уменьшение ресурса элементов ИО ПК на техническую производительность $Q_{\text{тех}}$ учитывалось следующим образом:

$$\delta Q_{\text{тех}ci} = \frac{Q_{\text{ц}i}}{Q_{\text{ц}1}} \cdot \delta T_{\text{ср}i} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

Значения для изменения теоретической производительности и удельных энергозатрат были получены в зависимости от положения комбайна относительно продольной оси выработки:

$$\delta Q_i = \frac{Q_{\text{ц}i} - Q_{\text{ц}1}}{Q_{\text{ц}1}} \cdot 100\% \quad (4.10)$$

$$\delta W_i = \frac{W_{\text{ц}i} - W_{\text{ц}1}}{W_{\text{ц}1}} \cdot 100\%. \quad (4.11)$$

Оценка влияния смещения относительно продольной оси выработки на показатели эффективности работы проходческого комбайна. В качестве примера в таблице 4.3 приведены результаты обработки данных математического моделирования для сечения выработки $S = 20,1 \text{ м}^2$, глубины зарубки $B = 0,4 \text{ м}$, шага фрезерования $\Delta H = 0,4 \text{ м}$, контактная прочность породы $p_k = 320 \text{ МПа}$.

Таблица 4.3 – Характеристики рабочего процесса обработки забоя в зависимости от положения комбайна в выработке

Положение комбайна (табл. 4.2)	$P_{срвц}$, кВт	Момент сопротивления		$V_{ц}$, м ³	$t_{ц}$, мин	$Q_{ц}$, м ³ /час	$W_{ц}$, кВт·ч/м ³
		M_{max} , Н·м	$M_{срвц}$, Н·м				
1	95,3	46420	26140	6,32	31,6	12,03	8,0
2	94,9	50850	26036	6,30	31,1	12,17	7,8
3	91,6	50850	25148	6,24	31,9	11,74	7,8
4	89,9	51390	24552	6,19	32,4	11,48	7,8
5	91,9	50740	25220	6,41	42,2	9,12	10,1
6	93,6	49340	25695	6,33	45,0	8,44	11,1
7	89,0	49350	24428	6,27	49,5	7,61	11,7
8	95,2	47620	26118	6,32	31,8	11,92	8,0

Анализ таблицы 4.3 показывает, что отклонение проходческого комбайна от продольной оси выработки относительно цикла с нулевым смещением приводит к повышению максимальных значений момента сопротивления на коронке до 11%. Это обусловлено перепадом текущей глубины зарубки в пределах одного реза, который может составлять до 6 раз (положение комбайна №7) и скорости подачи ИО, определяемой производительностью насоса и уровнем настройки предохранительного клапана.

При этом средний момент сопротивления находится на уровне 26 кНм и практически не зависит от положения комбайна в забое, что обусловлено изменением скорости подачи ИО в зависимости от нагрузки на коронке (при достижении давления в гидроцилиндре поворота исполнительного органа уставки предохранительного клапана происходит сброс рабочей жидкости).

Зависимость скорости подачи на коронке от ее нагруженности приводит также к изменению цикла обработки забоя. Так, с увеличением смещения комбайна от предыдущего цикла обработки приводит к увеличению времени цикла $t_{ц}$ на 57% и, соответственно, к снижению производительности $Q_{ц}$ на 37% и увеличению удельных энергозатрат $W_{ц}$ на 46%.

При изменении сочетания факторов в соответствии с планом имитационного моделирования получены соответствующие значения момента на коронке ИО.

Максимальная разница момента нагружения на коронке относительно положения с нулевым смещением наблюдается при снижении площади выработки S до 13 м^2 . Увеличение контактной прочности породы при сохранении мощности на разрушение на электродвигателе ИО при снижении площади выработки S до 13 м^2 приводит к увеличению значения максимального момента M_{max} на 56 % по сравнению с нулевым смещением, а снижение шага фрезерования незначительно влияет на соотношение максимальных моментов (1,5 % для $S = 13 \text{ м}^2$).

Таким образом, можно сделать вывод, что при уменьшении площади выработки смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки оказывает большее влияние на соотношение максимальных моментов, при этом шаг фрезерования соотношение не меняет. При сохранении уровня мощности на разрушение забоя изменение фактора контактной прочности породы не влияет на соотношение средних моментов на коронке, но приводит к увеличению максимальных моментов в 1,5 раза.

Объем разрушаемой породы за цикл разрушения при $\Delta H = 0,4 \text{ м}$ для различных сочетаниях параметров моделирования изменяется в пределах 1,5%, при $\Delta H = 0,2 \text{ м}$ колебание объема разрушаемой породы находится в пределах 5,5%.

Первое смещение комбайна влево на 0,1 м не приводит к ухудшению параметров эффективности разрушения, смещение 0,2 и 0,25 м соответственно приводит к снижению производительности за цикл на 2,4% и на 4,6%. Для повторных смещений комбайна вправо на 0,1; 0,2 и 0,25 м (положения 5, 6 и 7) наблюдается увеличение времени цикла обработки забоя и снижение производительности и рост удельных энергозатрат. Так, при положении комбайна №7 наблюдается наибольшее снижение производительности относительно положения №1 на 39% и повышение удельных энергозатрат на 46%, время цикла увеличивается на 56,6%. Повторное нулевое смещение (положение 8) приводит к снижению производительности за цикл на 0,9%, что подтверждает негативное влияние именно перепада в повторном смещении комбайна вправо относительно продольной оси выработки, который для положений 5, 6 и 7 составляет

соответственно 0,35; 0,45 и 0,5 м. Влияние изменения факторов модельного расчета на показатели эффективности работы комбайна отражено в табл. 4.6.

На рисунках 4.5 а – 4.5 в представлены графики момента нагружения на коронке исполнительного органа за цикл обработки забоя, которые позволяют выделить амплитуды нагружения. Кроме того, большие перепады глубины зарубки в циклах разрушения №5, №6 и №7, которые соответствуют повторному смещению вправо, приводят к уменьшению скорости подачи и это увеличивает количество циклов нагружения в цикле. В таблице 4.4 приведено изменение количество циклов нагружения относительно цикла с нулевым смещением. Максимальное увеличение количества циклов нагружения наблюдается при повторном смещении вправо на 0,25 м и составляет 76,6%.

Таблица 4.4 – Изменение количества циклов нагружения от смещения ПК

№ положения	Количество циклов нагружения	Прирост к положению №1, %
1	47663	-
2	46723	-2,0
3	47331	-0,7
4	47723	0,1
5	69905	46,7
6	79771	67,4
7	84157	76,6
8	48651	2,1

Как видно на рисунках 4.5, при смещении проходческого комбайна вправо или влево от оси выработки максимумы нагрузки на коронке смещаются в противоположную сторону. Это вызвано перепадом глубины зарубки по краям горизонтального реза. При этом изменяется количество резцов, находящихся в контакте с забоем, увеличивается скорость подачи при неизменной мощности на разрушение, что приводит к увеличению максимальной толщины стружки на резце, момента на отдельном резце и на коронке в целом. При этом также наблюдается увеличение времени цикла $t_{ц}$ на 55%.

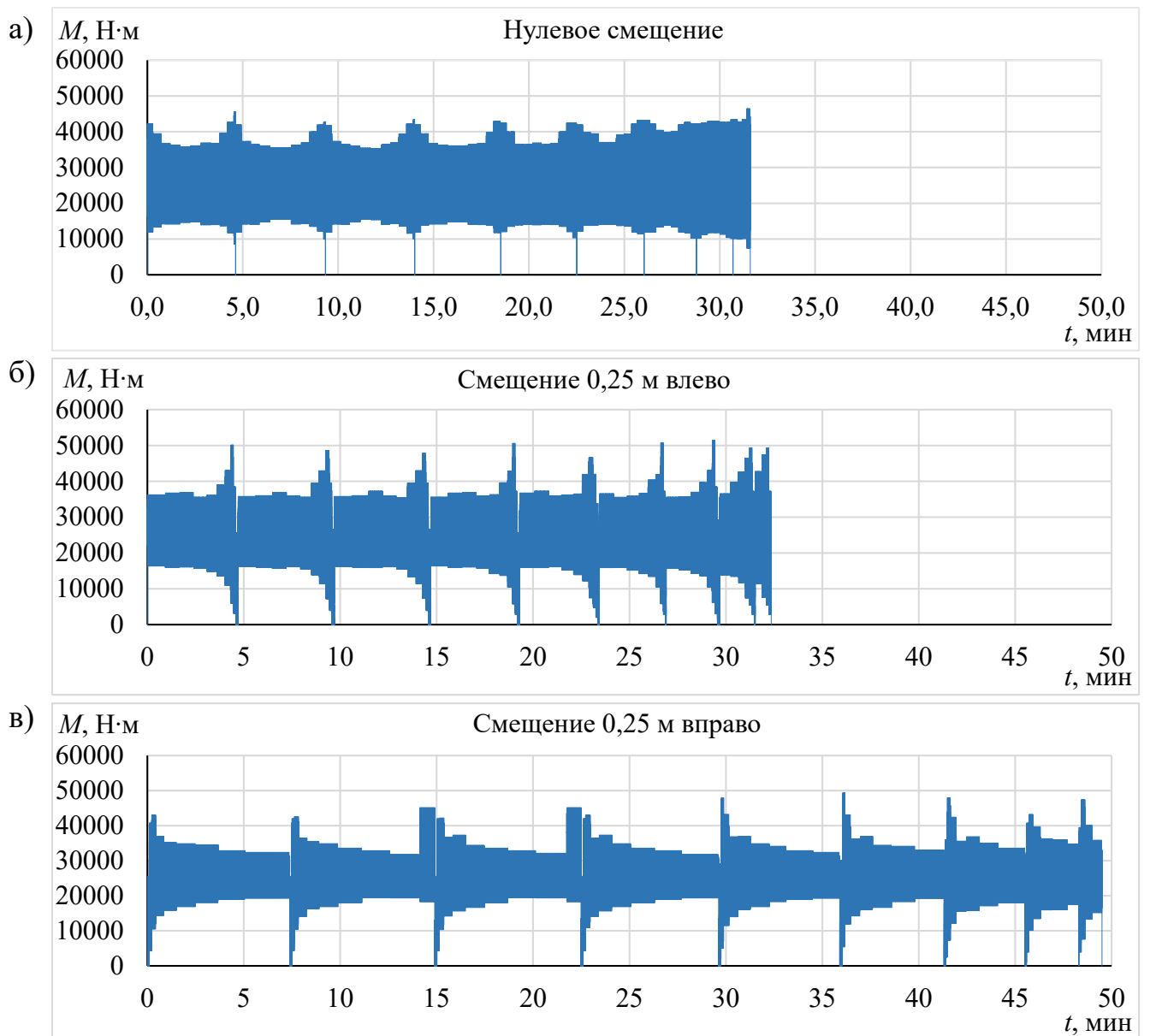


Рисунок 4.5 – Зависимость момента нагружения на коронке ИО от времени:

а) нулевое смещение; б) смещение 0,25 м влево; в) смещение 0,25 м вправо

На рисунке 4.6 приведены гистограммы распределения амплитуд крутящего момента на ИО для различных положений проходческого комбайна, полученные методом «дождя». Рисунок 4.6 а соответствует первому положению комбайна без смещения при передвижке. Рисунок 4.6 б соответствует четвертому положению со смещением влево на 0,25 м, рисунок 4.6 в – седьмому положению со смещением на 0,25 м вправо при второй передвижке.

Как видно из рисунков 4.6 б и 4.6 в, при смещении комбайна влево и вправо распределение частот повторения смещается в сторону первого и второго

интервала, при этом общее количество полуциклов нагружения в положении 4 не увеличивается, а в положении 7 увеличивается в 1,77 раз.

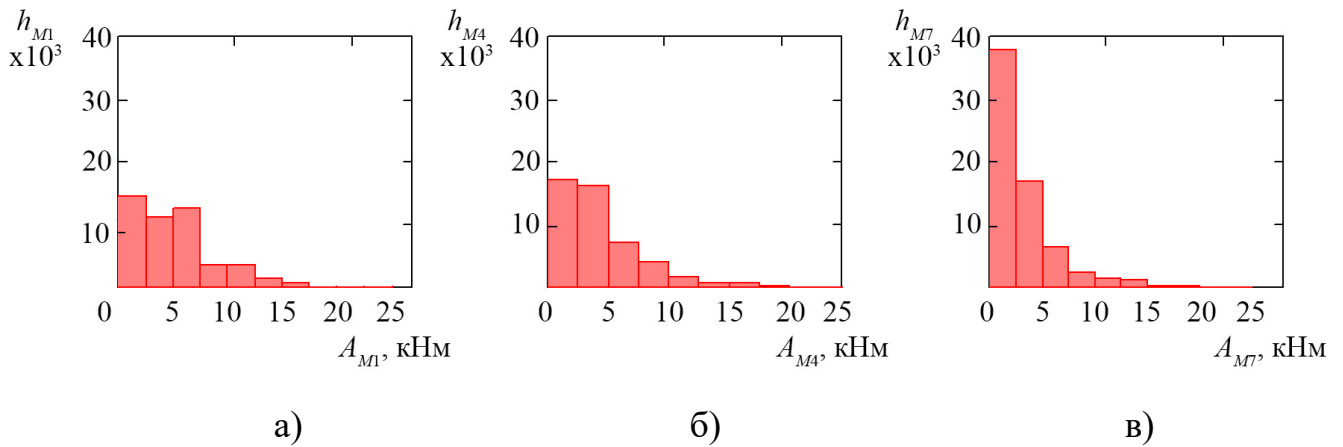


Рисунок 4.6 – Распределение амплитуд нагружения при частоте их повторения:

а) без смещения; б) смещение влево на 0,25 м; в) смещение вправо на 0,25 м

Полученные значения изменения ресурса δT по (4.8), изменения теоретической производительности $\delta Q_{ц}$ по (4.11), технической производительности $\delta Q_{техц}$ по (4.9) и энергозатрат $\delta W_{ц}$ по (4.12) в соответствии с планом вычислительного эксперимента (табл. 4.2) сведены в таблицы 4.5 и 4.6. Значения $\delta Q_{техц}$ приведены в % от положения №1 (без смещения). В таблице 4.5 представлены данные математического моделирования для значения контактной прочности породы $p_k = 320$ МПа, а в таблицу 4.6 – для $p_k = 600$ МПа. За 1 принят исходный ресурс ПК при разрушении забоя без смещения. Знак « - » перед значением $\delta Q_{ц}$, $\delta Q_{тех}$ и $\delta W_{ц}$ говорит о снижении производительности и удельных энергозатрат соответственно.

Анализ таблиц 4.5 и 4.6 показывает, что смещение проходческого комбайна от продольной оси выработки при обработке забоя приводит к существенному снижению ресурса элементов трансмиссии ИО комбайна. Для подшипников эта величина может достигать 30%, а для валов и зубчатых колес – порядка 64%. При этом наибольшее снижение ресурса в элементах трансмиссии отмечается при отклонении проходческого комбайна от оси выработки для большего шага фрезерования ($\Delta H = 0,4$ м), эта тенденция усиливается для малых сечений выработки (13 м^2).

При первом смещении проходческого комбайна относительно продольной

оси выработки (положение 2, 3, 4) наблюдается незначительное изменение ($\pm 15\%$) удельных энергозатрат по разрушению забоя, при этом с увеличением площади сечения выработки и шага фрезерования влияние положения комбайна на показатели эффективности использования машины снижается до 4%.

Таблица 4.5 – Влияние позиционирования проходческого комбайна на эффективность его функционирования при $p_k = 320$ МПа

Показатель		Положение проходческого комбайна по таблице 4.2						
		2	3	4	5	6	7	8
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,2$ м, площадь выработки $S = 13$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,88	0,82	0,85	0,72	0,87	0,88	0,81
	$m = 6$	0,59	0,37	0,40	0,37	0,53	0,47	0,81
	$m = 9$	0,36	0,16	0,16	0,15	0,28	0,19	0,82
$\delta Q_{ц}, \%$		10,70	9,50	9,50	-25,40	-32,30	-37,04	-19,23
$\delta Q_{техц}, \%$		67,52	49,25	51,39	30,74	37,76	32,24	65,60
$\delta W_{ц}, \%$		-9,59	-11,53	-13,73	31,52	42,77	51,99	23,80
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,2$ м, площадь выработки $S = 20,1$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,87	0,92	0,98	0,86	1,05	1,08	0,99
	$m = 6$	0,55	0,60	0,58	0,72	0,83	0,77	1,01
	$m = 9$	0,37	0,48	0,35	0,65	0,73	0,56	1,16
$\delta Q_{ц}, \%$		0,72	-2,69	-3,70	-31,70	-33,40	-43,70	7,94
$\delta Q_{техц}, \%$		60,05	64,93	61,38	50,84	57,94	45,35	113,81
$\delta W_{ц}, \%$		-2,07	-3,51	-5,31	39,33	49,99	64,06	-7,36
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,4$ м, площадь выработки $S = 13$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,90	0,80	0,85	0,84	0,95	0,83	1,01
	$m = 6$	0,58	0,33	0,37	0,38	0,51	0,37	1,00
	$m = 9$	0,31	0,11	0,13	0,13	0,24	0,14	0,99
$\delta Q_{ц}, \%$		1,30	5,50	6,00	-27,20	-35,80	-38,40	-1,76
$\delta Q_{техц}, \%$		60,41	43,34	47,65	32,62	36,34	27,43	98,18
$\delta W_{ц}, \%$		-1,32	-6,60	-8,66	35,98	52,10	57,73	1,79
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,4$ м, площадь выработки $S = 20,1$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,74	0,74	0,71	0,74	0,82	0,82	0,92
	$m = 6$	0,58	0,58	0,54	0,59	0,69	0,69	0,86
	$m = 9$	0,44	0,44	0,40	0,45	0,58	0,58	0,80
$\delta Q_{ц}, \%$		1,20	-2,40	-4,50	-24,20	-29,80	-36,70	-0,90
$\delta Q_{техц}, \%$		59,30	57,16	52,71	44,95	48,78	43,97	84,93
$\delta W_{ц}, \%$		-1,59	-1,40	-1,10	27,30	40,03	47,69	0,86

При последующем смещении проходческого комбайна относительно про-

дольной оси выработки в противоположную сторону (положение 5, 6, 7) для всех сочетаний шага фрезерования и площади сечения выработки наблюдается резкое повышение удельных энергозатрат (соответственно до 45% и до 64%).

Таблица 4.6 – Влияние позиционирования проходческого комбайна на эффективность его функционирования при $p_k = 600$ МПа

Показатель		Положение проходческого комбайна по таблице 4.2						
		2	3	4	5	6	7	8
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,2$ м, площадь выработки $S = 13$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,88	0,60	0,59	0,49	0,59	0,55	1,06
	$m = 6$	0,59	0,09	0,10	0,08	0,12	0,08	1,05
	$m = 9$	0,34	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	1,00
$\delta Q_{ц}, \%$		10,62	14,75	16,93	-26,30	-33,28	-38,18	7,95
$\delta Q_{техц}, \%$		66,80	26,73	27,31	14,13	16,15	13,13	111,53
$\delta W_{ц}, \%$		-9,60	-12,85	-16,42	35,72	43,24	51,19	-7,37
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,2$ м, площадь выработки $S = 20,1$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,84	0,69	0,74	0,62	0,76	0,71	1,05
	$m = 6$	0,51	0,24	0,26	0,21	0,34	0,20	1,06
	$m = 9$	0,38	0,12	0,12	0,08	0,21	0,08	1,04
$\delta Q_{ц}, \%$		2,01	3,85	3,16	-32,33	-33,97	-45,04	6,94
$\delta Q_{техц}, \%$		58,86	35,92	38,61	20,69	28,70	18,07	112,62
$\delta W_{ц}, \%$		-2,03	-8,84	-13,74	38,64	30,78	53,11	-6,55
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,4$ м, площадь выработки $S = 13$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,94	0,72	0,63	0,65	0,68	0,61	1,00
	$m = 6$	0,60	0,18	0,10	0,15	0,16	0,13	1,00
	$m = 9$	0,31	0,03	0,01	0,02	0,03	0,02	0,98
$\delta Q_{ц}, \%$		1,46	7,88	10,69	-29,12	-37,90	-41,08	-1,63
$\delta Q_{техц}, \%$		60,49	44,32	49,75	31,74	35,14	26,24	98,32
$\delta W_{ц}, \%$		-1,43	-7,29	-9,64	41,13	57,23	62,13	1,68
		Шаг фрезерования $\Delta H = 0,4$ м, площадь выработки $S = 20,1$ м ²						
$\delta T, \%$	$m = 3$	0,81	0,67	0,67	0,79	1,01	0,83	0,94
	$m = 6$	0,40	0,17	0,18	0,22	0,36	0,24	0,84
	$m = 9$	0,16	0,03	0,04	0,05	0,11	0,05	0,70
$\delta Q_{ц}, \%$		-0,20	-2,62	-3,36	-25,37	-27,52	-43,28	-0,48
$\delta Q_{техц}, \%$		45,72	28,39	29,00	26,36	35,90	21,36	81,88
$\delta W_{ц}, \%$		0,19	-0,40	-5,23	27,28	21,67	50,46	0,49

На рисунках 4.7, 4.8 отражено влияние позиционирования ПК на изменение соответственно технической производительности и ресурса трансмиссии ИО ПК.

$p_k = 320 \text{ МПа}$

$p_k = 600 \text{ МПа}$

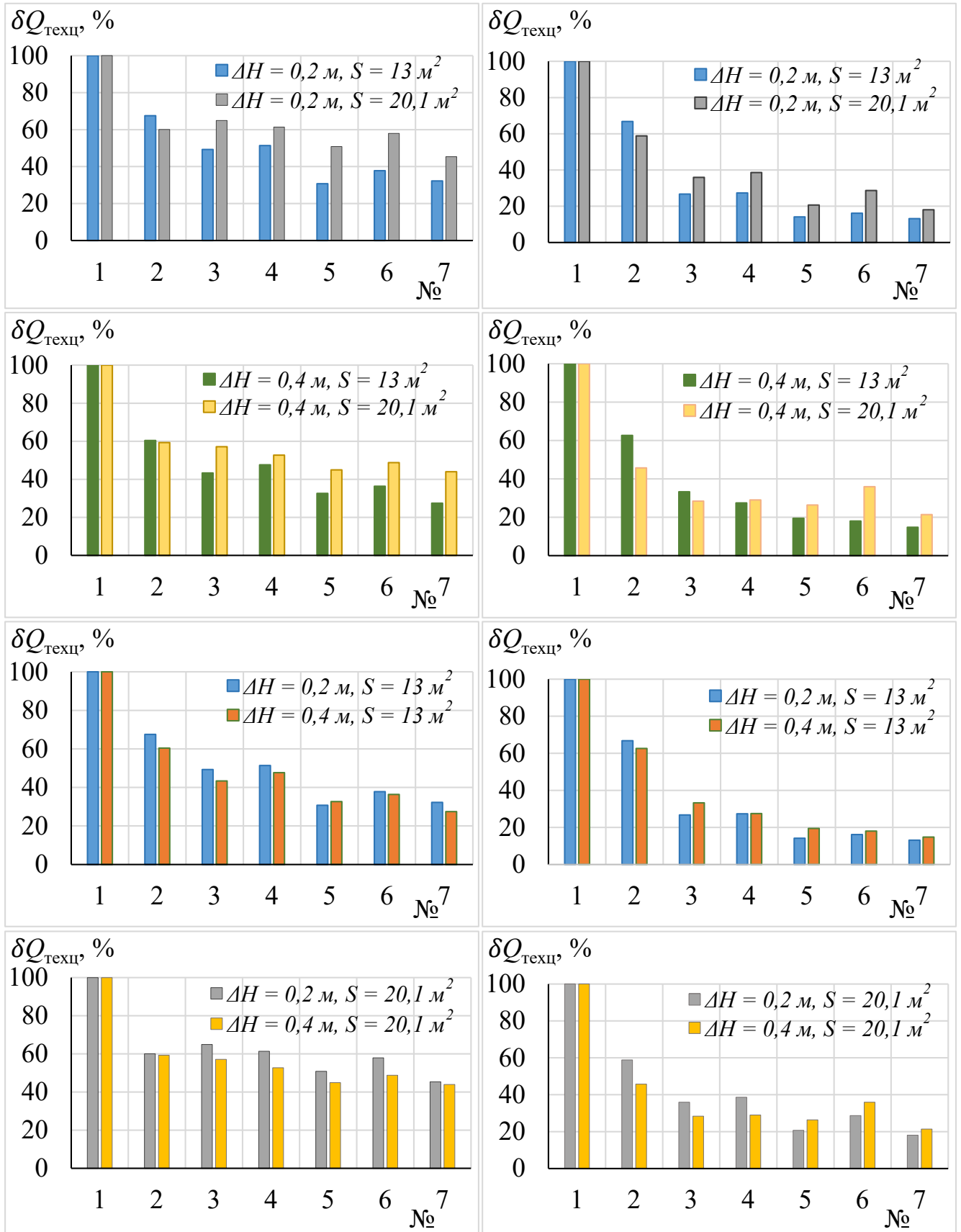


Рисунок 4.7 – Изменение технической производительности ПК $\delta Q_{\text{техц}}$ при различных положениях относительно продельной оси выработки по табл. 4.2

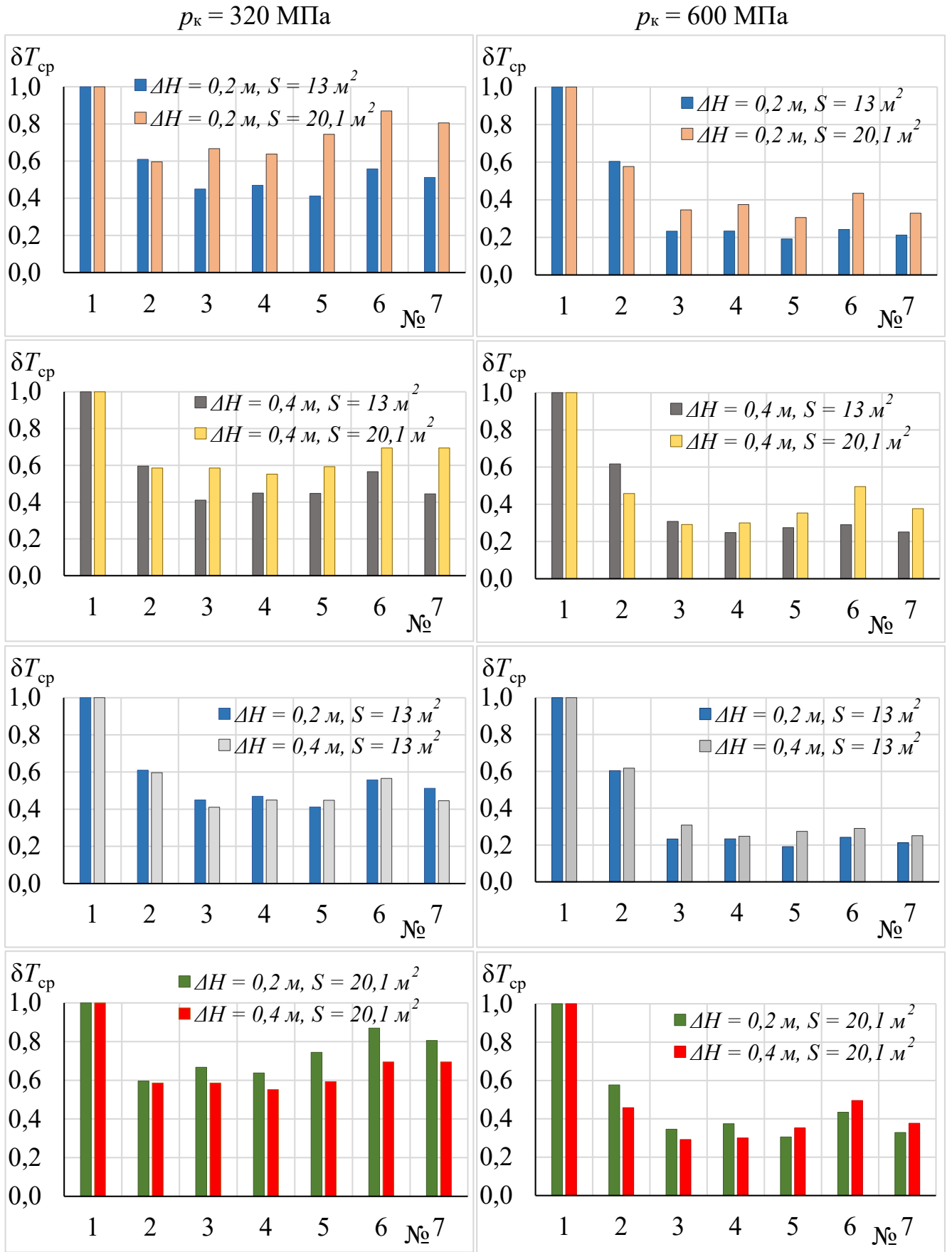


Рисунок 4.8 – Изменение ресурса элементов трансмиссии ИО в зависимости от смещения ПК относительно продольной оси выработки

Наиболее неблагоприятное сочетание параметров для обработки проходческого забоя комбайном КСП-35 является сечение выработки $S = 13 \text{ м}^2$ при шаге фрезерования $\Delta H = 0,4 \text{ м}$ и сдвиге вправо на $0,25 \text{ м}$ от оси выработки. При этом наблюдается наихудшее наложение негативных факторов: негативное влияние на ресурс элементов трансмиссии, снижение производительности и повышение удельных энергозатрат.

По результатам анализа таблиц 4.5 и 4.6 можно сделать следующие выводы о влиянии изменения параметров имитационного моделирования на результаты:

1) Увеличение смещения ПК относительно продольной оси выработки оказывает нарастающее негативное воздействие на техническую производительность ПК $\delta Q_{\text{техц}}$.

2) Со снижением сечения выработки с $20,1$ до 13 м^2 негативный эффект от смещения комбайна на $\delta Q_{\text{техц}}$ увеличивается при изменении шага фрезерования от $\Delta H = 0,2 \text{ м}$ до $\Delta H = 0,4 \text{ м}$.

3) Увеличение контактной прочности породы до 600 МПа усугубляет негативный эффект от смещения комбайна на $\delta Q_{\text{техц}}$ и удельные энергозатраты $W_{\text{ц}}$.

4) Наибольшее негативное влияние смещения ПК относительно продольной оси выработки на $\delta Q_{\text{техц}}$ наблюдается при $p_{\text{к}} = 600 \text{ МПа}$, $\Delta H = 0,2 \text{ м}$ и $S = 13 \text{ м}^2$. При этом наблюдается падение производительности до $\delta Q_{\text{техц}} = 13,1 \%$ от нулевого смещения. При таком сочетании факторов также наблюдается повышение удельных энергозатрат за цикл на $51,2 \%$.

5) На ресурс отдельных элементов трансмиссии при позиционировании ПК в выработке наиболее негативно влияют изгибающие усилия (показатель кривой усталости $m = 9$). При этом ресурс элементов трансмиссии снижается наиболее интенсивно по отношению к положению с нулевым смещением (до 98%).

6) Наибольшее влияние на снижение ресурса элементов трансмиссии ИО при различных смещениях проходческого комбайна относительно продольной оси выработки имеет снижение площади выработки с $20,1 \text{ м}^2$ до 13 м^2 при $\Delta H = 0,4 \text{ м}$ и $\Delta H = 0,2 \text{ м}$.

7) При $S = 13 \text{ м}^2$ повышение ΔH с 0,2 м до 0,4 м приводит к незначительному дополнительному снижению ресурса элементов трансмиссии (до 5 %) при различных смещениях ПК (см. рисунок 4.8 $p_k = 320 \text{ МПа}$).

8) При $S = 20,1 \text{ м}^2$ для $p_k = 320 \text{ МПа}$ увеличение шага фрезерования ΔH с 0,2 м до 0,4 м приводит к увеличению негативного эффекта на ресурс отдельных элементов трансмиссии уже при первом смещении комбайна.

9) При $S = 13 \text{ м}^2$ для $p_k = 600 \text{ МПа}$ повышение ΔH с 0,2 м до 0,4 м приводит к дополнительному снижению ресурса элементов трансмиссии до 20 % при различных смещениях ПК относительно продольной оси выработки.

10) При $S = 20,2 \text{ м}^2$ для $p_k = 320 \text{ МПа}$ наихудшее влияние на изменение ресурса отдельных элементов трансмиссии оказывает смещение влево после первой передвижки комбайна, для $p_k = 600 \text{ МПа}$ при любом сочетании факторов увеличение смещения относительно продольной оси выработки приводит к более интенсивному снижению ресурса отдельных элементов трансмиссии.

11) Наихудшее сочетание факторов, негативно влияющих на ресурс отдельных элементов трансмиссии ИО, является $S = 13 \text{ м}^2$, $\Delta H = 0,2 \text{ м}$. При этом сочетании площади выработки и шага фрезерования наблюдаются наибольшие значения снижения ресурса и достигают 59 % при $p_k = 320 \text{ МПа}$ и 80,8% при $p_k = 600 \text{ МПа}$. При изменении параметра смещения негативный эффект на ресурс элементов трансмиссии сохраняется.

Таким образом, смещение проходческого комбайна относительно оси выработки, обусловленное ручным принципом управления (в виду психофизиологических возможностей и квалификации оператора), на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению эффективности функционирования комбайна при любом сочетании сечения выработки и шага фрезерования. Для обеспечения точности позиционирования проходческого комбайна внутри коридора $\pm 0,05 \text{ м}$ от продольной оси выработки необходимо разработать метод определения положения проходческого комбайна в выработке и обосновать необходимую точность и количество измерений.

4.2 Разработка метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки

В соответствии с четвертой задачей исследования был предложен метод определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки. На рисунке 4.9 представлена расчетная схема к методу определения положения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки.

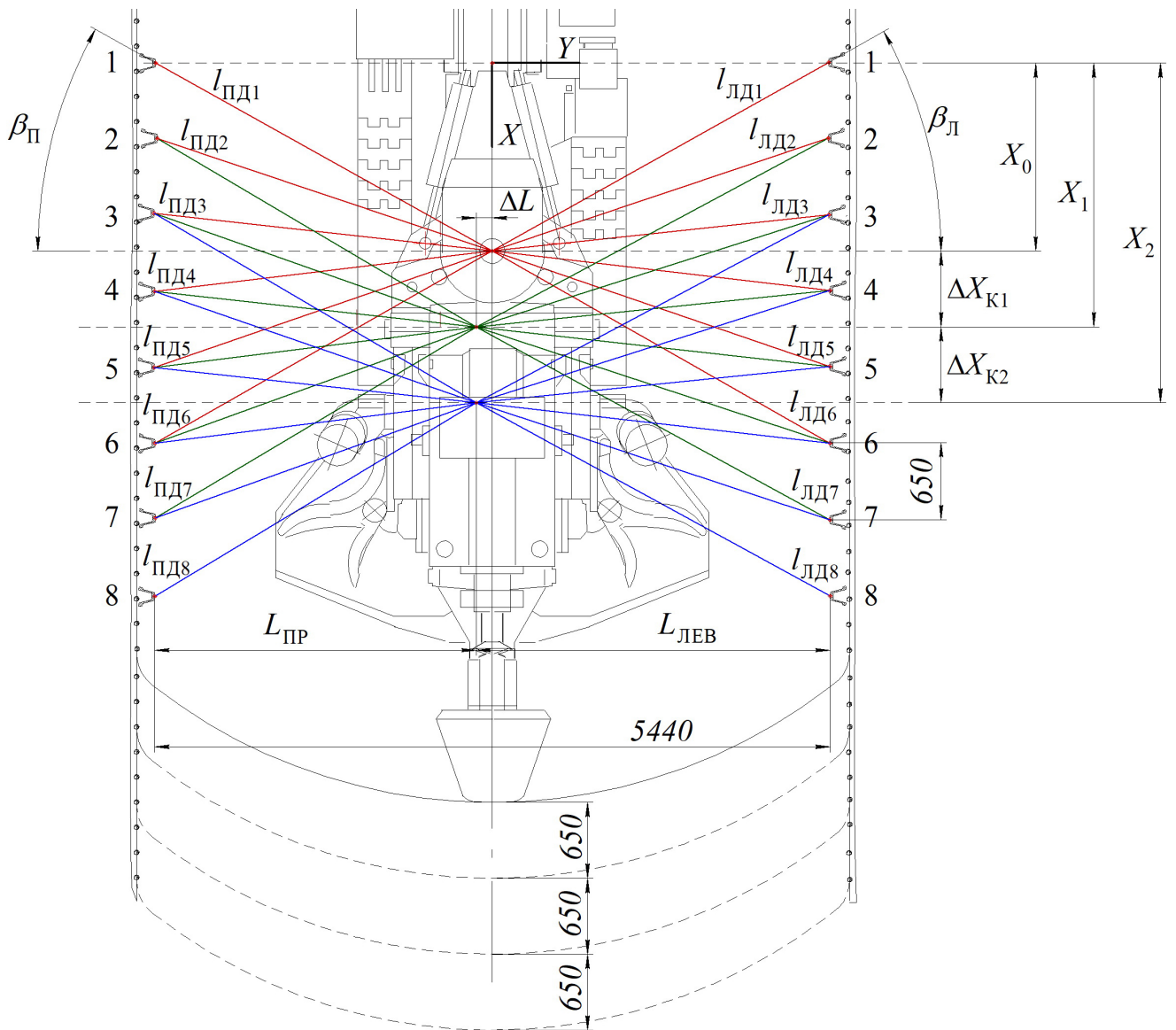


Рисунок 4.9 – Расчетная схема к методу определения положения проходческого комбайна в координатах выработки

Измерение производится перед и после передвижки проходческого комбайна. Измеренные значения записываются в память контроллера системы позиционирования, по полученным данным вычисляется смещение проходческого комбайна относительно оси выработки и выдается значение корректирующего смещения. При передвижке комбайна на величину ΔX_k , соответствующую глубине зарубки коронки (кратной шагу установки арочной крепи), оператор устанавливает проходческий комбайн относительно продольной оси выработки со смещением ΔL в допустимом коридоре $\pm 0,05$ м с учетом рекомендованного корректирующего смещения. После передвижки машины повторно измеряются расстояния до предыдущих арок ($m-1$), а также производится измерение до следующей арки. После каждого цикла обработки забоя операция повторяется.

Для реализации предложенного метода определения местоположения проходческого комбайна в системе координат выработки разработан алгоритм последовательного вычисления, представленный на рисунке 4.10. Алгоритм предполагает поэтапную обработку данных, полученных от левого и правого дальномеров, определение координат комбайна и арок крепи, определение смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и выдачу корректирующего смещения комбайна для удержания машины в пределах допустимого коридора.

В соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.10, для определения смещения проходческого комбайна после передвижки в процессе прохождения выработки разработана математическая модель (зависимости 4.12-4.21), учитывающая погрешность измерений, неточность в установке арок крепи относительно средней линии выработки в поперечной плоскости и несовпадение шага установки арок крепи в продольной плоскости. Вычисление смещения по данным измерений от левого и правого дальномера ведется параллельно. На каждом этапе предусмотрена компенсация погрешностей и усреднение значений измерений. Основным преимуществом метода является учет повторяемости измерений и хранение в памяти координат всех стоек крепи, углов наклона ПК и смещений ПК относительно продольной оси выработки.



Рисунок 4.10 – Структурная схема алгоритма реализации метода определения местоположения проходческого комбайна по данным дальномеров

На первом этапе алгоритма введенные данные после предварительной обработки формируются в массивы данных $L_{лев}$ и $L_{пр}$ расстояния по нормали для левых и правых стоек арочной крепи:

$$L_{лев} = \begin{matrix} L_{лев1} & L_{лев2} & & L_{левn-6} & L_{левn-5} \\ L_{лев2} & L_{лев3} & & L_{левn-5} & L_{левn-4} \\ L_{лев3} & L_{лев4} & \dots & L_{левn-4} & L_{левn-3} \\ L_{лев4} & L_{лев5} & & L_{левn-3} & L_{левn-2} \\ L_{лев5} & L_{лев6} & & L_{левn-2} & L_{левn-1} \\ L_{лев6} & L_{лев7} & & L_{левn-1} & L_{левnст} \end{matrix} \quad (4.12)$$

$$L_{\text{пр}} = \begin{matrix} L_{\text{пр}1} & L_{\text{пр}2} & & L_{\text{пр}n-6} & L_{\text{пр}n-5} \\ L_{\text{пр}2} & L_{\text{пр}3} & & L_{\text{пр}n-5} & L_{\text{пр}n-4} \\ L_{\text{пр}3} & L_{\text{пр}4} & \dots & L_{\text{пр}n-4} & L_{\text{пр}n-3} \\ L_{\text{пр}4} & L_{\text{пр}5} & & L_{\text{пр}n-3} & L_{\text{пр}n-2} \\ L_{\text{пр}5} & L_{\text{пр}6} & & L_{\text{пр}n-2} & L_{\text{пр}n-1} \\ L_{\text{пр}6} & L_{\text{пр}7} & & L_{\text{пр}n-1} & L_{\text{пр}n\text{СТ}} \end{matrix} \quad (4.13)$$

где $n_{\text{СТ}}$ – количество стоек арочной крепи, пройденных комбайном от начального положения.

Разработанная математическая модель предполагает последовательное вычисление значений сдвига проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и определение корректирующего воздействия на величину смещения.

На втором этапе алгоритма определяется смещения относительно предыдущего положения.

Для определения матрицы значений сдвигов $\Delta L_{\text{ЛД}}$, $\Delta L_{\text{ПД}}$ комбайна по измеренным данным дальномеров предложена схема, представленная на рисунке 4.11 для левого дальномеров, для правого – схема аналогична. Схема предусматривает попарное вычитание значений предыдущего измерения из последующего для арок с одинаковым номером.

$$L_{\text{лев}} = \begin{matrix} L_{\text{лев}1} & L_{\text{лев}2} & & L_{\text{лев}n-6} & L_{\text{лев}n-5} \\ L_{\text{лев}2} & L_{\text{лев}3} & & L_{\text{лев}n-5} & L_{\text{лев}n-4} \\ L_{\text{лев}3} & L_{\text{лев}4} & \dots & L_{\text{лев}n-4} & L_{\text{лев}n-3} \\ L_{\text{лев}4} & L_{\text{лев}5} & & L_{\text{лев}n-3} & L_{\text{лев}n-2} \\ L_{\text{лев}5} & L_{\text{лев}6} & & L_{\text{лев}n-2} & L_{\text{лев}n-1} \\ L_{\text{лев}6} & L_{\text{лев}7} & & L_{\text{лев}n-1} & L_{\text{лев}n\text{СТ}} \end{matrix}$$

Рисунок 4.11 – Схема определения матрицы сдвигов проходческого комбайна

В соответствии со схемой рисунок 4.11 элементы матрицы сдвигов определяются следующим образом:

$$\Delta L_{\text{ЛД}i,j} = L_{\text{лев}i,j} - L_{\text{лев}i+1,j-1} \quad i = 1 \dots m-1, j = 2 \dots n \quad (4.14)$$

$$\Delta L_{\text{ПДр}i,j} = L_{\text{пр}i,j} - L_{\text{пр}i+1,j-1}, \quad (4.15)$$

где m – количество строк в матрице данных (равно количеству измерений за проход).

Размерность полученных матриц $\Delta L_{\text{ЛД}}, \Delta L_{\text{ПД}} - (m-1, n_{\text{СТ}})$.

На третьем этапе алгоритма для уменьшения влияния погрешности измерения расстояния на вычисления смещение комбайна относительно предыдущего положения определяется как:

$$\Delta L_{\text{Л}j} = \frac{\sum_{i=0}^k \Delta L_{\text{ЛД}k,j}}{k}, \Delta L_{\text{П}j} = \frac{\sum_{i=0}^k \Delta L_{\text{ПД}k,j}}{k} \quad (4.16)$$

где $k = 1 \dots m-1$.

При этом формируются новые одномерные массивы сдвигов комбайна относительно предыдущего положения, вычисленные по показаниям левого и правого дальномера, с добавлением нового элемента после каждой передвижки.

На четвертом этапе алгоритма определяются координаты комбайна и стоек крепи в системе координат выработки

Смещение проходческого комбайна по показаниям левого и правого дальномера определяется как сумма значений сдвигов относительно предыдущего положения $\Delta L_{\text{Л}}, \Delta L_{\text{П}}$.

$$\Delta L_{\text{ЛК}} = \sum_{i=0}^n \Delta L_{\text{Л}i}, \Delta L_{\text{ПК}} = \sum_{k=0}^n \Delta L_{\text{П}i} \quad (4.17)$$

где n – текущее количество передвижек с начала прохождения выработки

Таким образом формируется одномерные массивы смещений комбайна относительно средней линии выработки, определенные по показаниям левого и правого датчика с добавлением новых значений после каждой передвижки.

Координата комбайна в системе координат выработки определяется как среднее арифметическое между текущим значением смещения по левому и правому датчику:

$$Y_{\Pi} = \begin{cases} 100 \\ -Y_{\Pi A_{1,1}} \text{ для } i = 1 \\ -\frac{\sum_{k=1}^i Y_{\Pi A_{k,i-k+1}}}{i} \text{ для } i \in 2 \div 5, \\ -\frac{\sum_{k=1}^5 Y_{\Pi A_{k,i-k+1}}}{6} \text{ для } i \geq 6 \end{cases} \quad (4.21)$$

где i – номер столбца в двумерной матрице $Y_{\text{ЛА}}$

Координата X арок и комбайна определяется аналогично методом вычисления расстояний между арками по оси X в каждом измерении.

Таким образом, описанный метод определения положения проходческого комбайна позволяет определить смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки при фиксированном количестве измерений, а также определять в реальном времени координаты проходческого комбайна и арок крепи в системе координат выработки, установить четкое соответствие между ними и выработать корректирующее смещение для удержания машины в пределах коридора $\pm 0,05$ м относительно средней линии с целью обеспечения требуемой производительности и энергоэффективности и сохранения ресурса силовых систем.

4.3 Исследование влияния количества и погрешности измерений на формирование корректирующего воздействия

Для реализации предложенного метода определения положения проходческого комбайна в координатах выработки на основе разработанного алгоритма с использованием выше приведенной модели (4.12)...(4.21) разработана программа в приложении MathCAD, позволяющая определять координаты проходческого комбайна, текущее смещение относительно продольной оси выработки, выдавать корректирующее воздействие для компенсации текущего смещения.

Для определения влияния количества измерений и допустимой погрешности дальномеров на точность позиционирования проходческого комбайна

относительно продольной оси выработки после формирования корректирующего смещения были проведены модельные исследования.

При моделировании приняты условия, описанные в п.2.1. Ширина выработки по аркам крепи составляет 5,44 м, расстояние между арками постоянной крепи составляет 0,65 м.

Входными величинами являлись значения расстояний от места установки датчиков до стоек крепи, расположенных со смещением в случайном порядке относительно оси выработки, измеренные дальномерами слева и справа от проходческого комбайна, углы поворота чувствительного элемента при каждом измерении и сгенерированные случайным способом значения погрешности измерений. На основе опыта эксплуатации проходческих комбайнов с учетом переборов и неровности стенок подготовительной выработки принят разброс в поперечной плоскости значений расстояния от арок до средней линии равный 0,3 м. Учитывая длину затяжки и способ жесткой фиксации арок между собой принят разброс значений шага установки арок 0,06 м. Проведенный анализ представленных на рынке средств измерения расстояния (дальномеры) показывает колебание погрешности измерений в зависимости от применяемого типа чувствительного элемента, конструктивных особенностей, качества и цены изделия на уровне 0,2...2% от диапазона измеряемой величины.

Для получения массивов значений расстояния от продольной оси до арок крепи по нормальному закону распределения вероятности сгенерированы 300 значений с величиной отстояния от средней линии 2,72 м, стандартное отклонение 0,05 м, при этом шаг установки арок крепи составляет 0,65 м, стандартное отклонение 0,01 м. Таким образом, были сгенерированы исходные данные соответствующие длине выработки 195 м. Также по нормальному закону распределения вероятности сгенерированы значения смещения комбайна влево и вправо относительно средней линии со стандартным отклонением 0,017 м. Значения смещения учтены при формировании массивов данных измерения расстояния от арок до комбайна. Исходные данные для моделирования представлены на рисунке 4.13. Также при формировании матриц измерений для

каждого варианта количества измерений сгенерирована погрешность по нормальному закону распределения, соответствующая уровню 0,1%, 0,5%, 1% и 2% от диапазона измерений.

Максимальное количество измерений расстояния до арки крепи за одну передвижку – восемь, что ограничивается углом поворота чувствительного элемента и дальностью измерения. Минимальное количество измерений – четыре, что обусловлено погрешностью измерения расстояния дальномером и требуемой точностью позиционирования.

На рисунке 4.13 представлены сгенерированные значения расстояния от продольной оси до арок крепи (отмечены крестами) и смещения комбайна от продольной оси выработки (отмечены круглыми маркерами) для первых 50 м выработки. Координата Y указывает на расстояние от средней линии выработки до стойки крепи, координата X – пройденное расстояние от начала измерения.

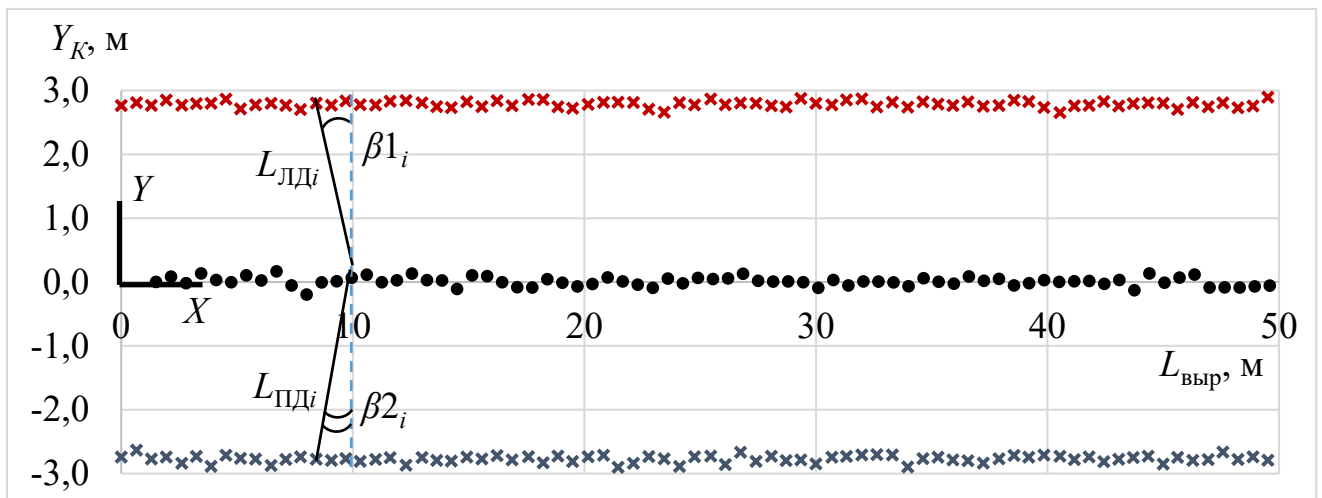


Рисунок 4.13 – Исходные данные для моделирования

Выходными величинами являются значения погрешности позиционирования проходческого комбайна относительно средней линии после корректирующего воздействия.

Для реализации поставленной задачи модельных исследований был разработан план проведения математического моделирования и перечень изменяемых параметров, приведенный в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – План математического моделирования

Наименование параметра	Значение
Количество измерений при каждой передвижке проходческого комбайна	4, 6, 8
Погрешность измерений расстояния до арок крепи, %	0,1; 0,5; 1; 2

Математическое моделирование реализовывалось с перебором всех возможных вариантов сочетания количества измерений и погрешности измерений по таблице 4.7.

В качестве примера на рисунке 4.14 представлены значения величины смещения проходческого комбайна относительно оси выработки от длины пройденной выработки после применения корректирующего воздействия на комбайн с дальномерами, имеющими различную погрешность. При шести измерениях с различными значениями погрешности датчика (рисунок 4.14 а) и при погрешности датчика 0,5 % для различного количества измерений (рисунок 4.14 б).

На рисунке 4.14 а цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены кривые изменения положения проходческого комбайна в выработке при погрешности измерения расстояния от комбайна до стоек арочной крепи 0,1%, 0,5%, 1% и 2% соответственно. Как видно из рисунка 4.14 а, при увеличении погрешности измерения увеличивается отклонение машины относительно продольной оси выработки и расширяется коридор, в котором система позиционирования способна ее удерживать. При возрастании погрешности увеличивается ее влияние на накопление ошибки корректировки положения машины в выработке. Так, погрешность в 1% на треть сокращает длину регулируемого участка, вдоль которого возможно удержание комбайна в пределах заданного коридора, что приводит к необходимости частого сброса данных и возобновления алгоритма вычисления местоположения.

На рисунке 4.14 б цифрами 5, 6 и 7 обозначены кривые изменения местоположения комбайна в выработке относительно ее оси при фиксированном

значении погрешности измерения 0,5% и изменении количества измерений за шаг передвижки, равного 4, 6 и 8 соответственно.

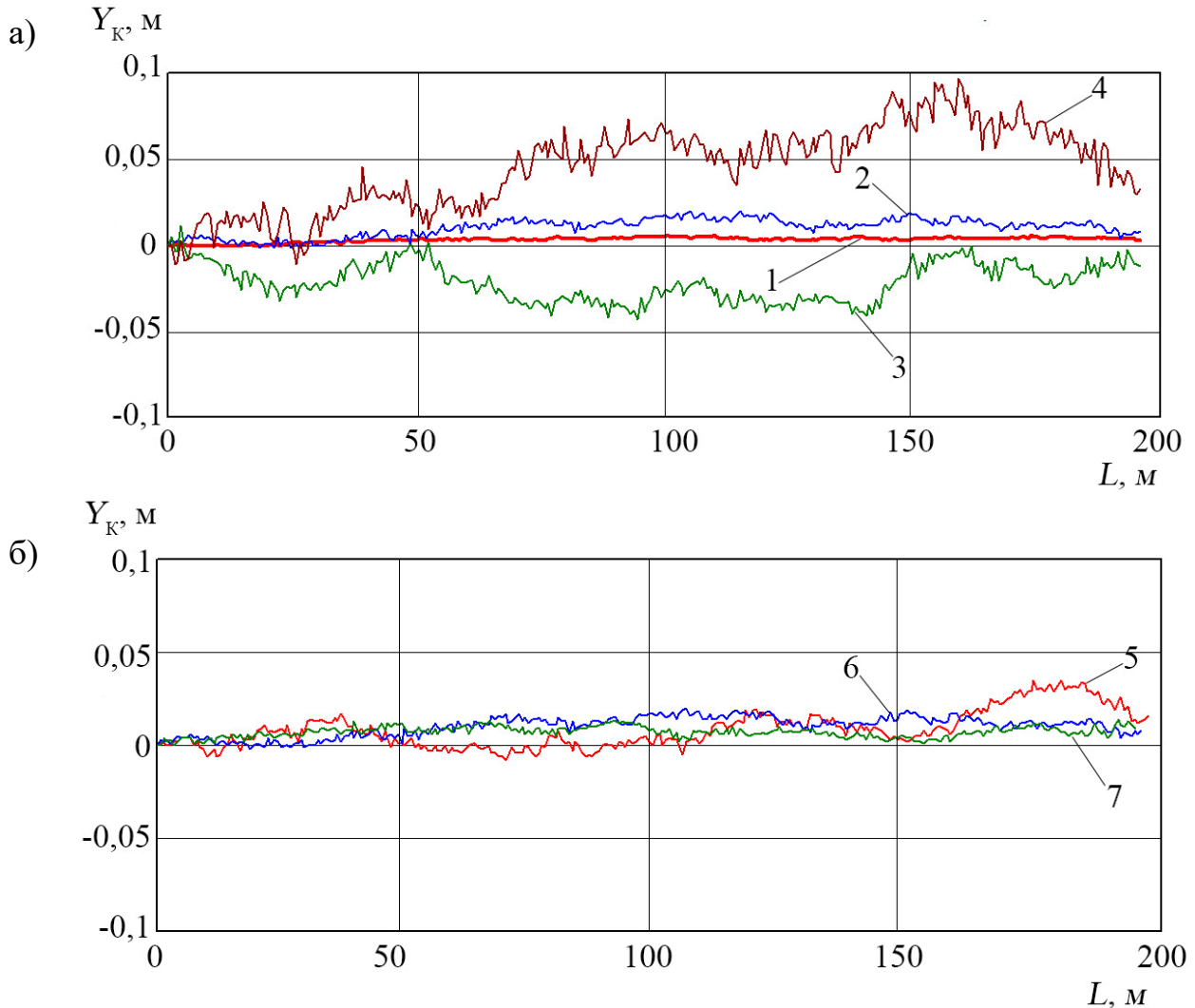


Рисунок 4.14 – Смещение проходческого комбайна относительно оси выработки после корректировки для шести измерений (а) и для погрешности 0,5% (б)

Как видно из рисунка 4.14 б, кривые не отклоняются от продольной оси выработки более 0,05 м для любого количества измерений от 4 до 8. Увеличение количества измерений до 8 (кривая 7) повышает точность позиционирования за счет усреднения большего количества значений при измерении по (4.15), (4.19), (4.21) и (4.22).

Данные моделирования изменяются с каждым вычислением корректирующих смещений и координат комбайна, так как при каждом запуске модели генерируется новый набор значений погрешности измерений в пределах

заданного рассеяния. Для получения максимумов возможных смещений проходческого комбайна после корректировки для каждого сочетания факторов моделирование проведено по десять раз, и из полученных данных выделены максимумы отклонения проходческого комбайна от продольной оси выработки. Максимумы полученных данных отклонения проходческого комбайна после корректировки положения для каждого сочетания факторов сведены в таблицу 4.8 в соответствии с условиями математического моделирования по таблице 4.7.

Таблица 4.8 – Максимальное отклонение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки, м

		Погрешность измерений			
		0,1%	0,5%	1%	2%
Количество измерений	4	0,014	0,058	0,105	0,326
	6	0,008	0,031	0,087	0,136
	8	0,006	0,025	0,055	0,106

Как видно из таблицы 4.8, увеличение погрешности измерений и уменьшение их количества приводит к потере точности позиционирования машины в выработке. Лучшие сочетания факторов математического моделирования, удовлетворяющие необходимой точности позиционирования, обведены рамкой.

Наименее предпочтительным является количество измерений 4, так как в алгоритме применяется усреднение показаний датчиков по (4.15) для минимизации влияния погрешности, и, как показывают результаты модельного расчета, применение такого количества измерений является оправданным только при высокой точности измерений. При этом только точность измерений 0,1% соответствует цели математического моделирования.

При сочетании факторов (0,5%, 4 изм.), (1%, 8 изм.) происходит выход машины за пределы коридора $\pm 0,05$ м, однако, это отклонение является незначительным (17% и 10% соответственно) и проявляется не при всех подходах моделирования (ячейки выделены серым цветом).

Погрешность измерений 2% является неудовлетворительной. Такая точность измерения расстояния до стоек арочной крепи не позволяет адекватно управлять проходческим комбайном в выработке при любом количестве измерений, и не может рассматриваться при разработке системы позиционирования.

Для погрешности измерений 1% допустимо к применению только количество измерений 8, так как иное количество приводит к неудовлетворительной точности позиционирования.

Увеличение количества точек измерения до 8 повышает точность позиционирования, но является избыточным, так как увеличивает время измерения расстояний и определения координат, количество хранимых данных и угол поворота чувствительного элемента датчика, ограниченный конструктивно.

Проведенное математическое моделирование позволило подтвердить работоспособность предложенного метода определения положения проходческого комбайна в координатах выработки и обосновать оптимальное сочетание количества и погрешности измерений.

Таким образом, наиболее оптимальным сочетанием количества и качества измерений, позволяющих успешно удерживать проходческий комбайн в коридоре $\pm 0,05$ м относительно продольной оси выработки, является 6 измерений при допустимой погрешности до 0,5%.

Разработанный метод измерения и алгоритм обработки данных позволяет уменьшить влияние человеческого фактора при дистанционном управлении проходческим комбайном в зоне видимости. Разработанная на его основе интеллектуальная автоматизированная система позиционирования позволит оператору сохранять выбранное направление выработки, удерживать машину в заданном коридоре, что, в свою очередь, позволит повысить его производительность и энергоэффективность.

4.4 Выводы по разделу 4

1. На основе модельных исследований рабочего процесса проходческого комбайна КСП-35 с осевой коронкой теоретически установлено, что смещение комбайна относительно продольной оси выработки, обусловленное ручным принципом управления (в виду психофизиологических возможностей и квалификации оператора), на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению эффективности функционирования комбайна при любом сочетании сечения выработки и шага фрезерования.

2. В результате смещения проходческого комбайна от оси выработки происходит существенное изменение глубины зарубки в процессе обработки забоя с явным смещением максимума в одну сторону. При этом диапазон изменения глубины зарубки при боковом резе находится в пределах от 0,1 до 0,63 м (для выработки сечением 20,1 м² и величины смещения 0,25 м). Это обуславливает снижение теоретической производительности проходческого комбайна до 43,7%, повышение удельных энергозатрат на разрушение и времени цикла обработки забоя соответственно до 64,1% и 56,6%, а также снижение ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа (для подшипников до 43%, валов и зубчатых колес до 64%).

3. Повышение технического уровня и эффективности работы проходческих комбайнов избирательного действия может быть достигнуто на базе системы автоматизированного позиционирования комбайна в выработке на основе перманентного анализа информации от датчиков о параметрах рабочего процесса, обеспечивающей оптимальные параметры обработки забоя.

4. Предложен метод определения местоположения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки при помощи дальномера с изменяемым углом поворота луча, который позволяет определить отклонение проходческого комбайна от продольной оси выработки и сформировать корректирующее смещение после передвижки в реальном времени.

5. Предложен алгоритм, заключающийся в определении корректирующего воздействия при передвижке комбайна для его удержания в заданном коридоре относительно продольной оси выработки, и разработана математическая модель, позволяющая реализовать предложенный метод, уменьшить влияние разброса значений и погрешности измерений на формирование корректирующего смещения комбайна.

6. Необходимым и достаточным условием реализации необходимой точности позиционирования в пределах заданного коридора является оснащение проходческого комбайна автоматизированной системой позиционирования, обеспечивающей точность определения расстояния до арок не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6.

7. Предложенный метод измерения возможно применить при прохождении выработок разного сечения различными типами проходческих комбайнов с требуемой точностью позиционирования при сохранении точности измерения.

Рассматриваемые в разделе вопросы изложены в работах соискателя [119, 120, 121].

РАЗДЕЛ 5**РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРОХОДЧЕСКОГО
КОМБАЙНА**

Как показали результаты проведенного имитационного моделирования п. 4.1, смещение ПК относительно продольной оси выработки после передвижки влияет на основные показатели эффективности работы ПК – удельные энергозатраты, теоретическую производительность и ресурс элементов трансмиссии исполнительного органа. При этом был установлен коридор, в пределах которого смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки не оказывает существенного влияния на показатели работы машины.

Разработан метод определения местоположения проходческого комбайна, который позволяет осуществить привязку машины к реальным условиям проведения выработки и обеспечить необходимую точность позиционирования путем постоянного измерения расстояния до ближайших арок крепи, хранения в базе данных, вычисления необходимого корректирующего воздействия и выдачи сигнала в систему управления проходческим комбайном.

Для практической реализации разработанного метода и обеспечения требуемого коридора необходима разработка средств позиционирования комбайна и коронки его исполнительного органа в системе координат выработки.

**5.1 Структура и алгоритм работы средств позиционирования
проходческого комбайна**

Одной из особенностей предложенного в п.4.2 метода определения местоположения ПК и коронки ИО в системе координат выработки является непрерывное поочередное определение расстояния от корпуса комбайна до арок крепи. При этом также требуется определение углов наклона корпуса

проходческого комбайна по осям XYZ выработки для выставления плоскости измерения, а также углов подъема и поворота стрелы α и β соответственно.

Основной задачей средств позиционирования проходческого комбайна в системе координат выработки является установление с допустимой погрешностью расстояния от специально определенной точки установки устройства на корпусе комбайна до арочной крепи на боковой стенке выработки для заполнения массивов данных $L_{лев}$ и $L_{пр}$ по (4.9). При этом измерение расстояния должно проводиться в плоскости параллельной почве для исключения погрешности, для чего необходима корректировка положения измерительного элемента в пространстве до начала измерений на величину отклонения углов наклона корпуса комбайна $\Delta\varphi$, $\Delta\theta$, $\Delta\psi$ по осям XYZ соответственно.

Решение этой задачи требует разработки структуры и алгоритма работы устройства измерения расстояния до стоек крепи (дальномера) с автоматической коррекцией углов по осям ЛСК относительно системы координат выработки.

На рисунке 5.1 представлена структурная схема устройства измерения расстояния на основе фазного лазерного дальномера с системой измерения углов и коррекцией положения чувствительного элемента.

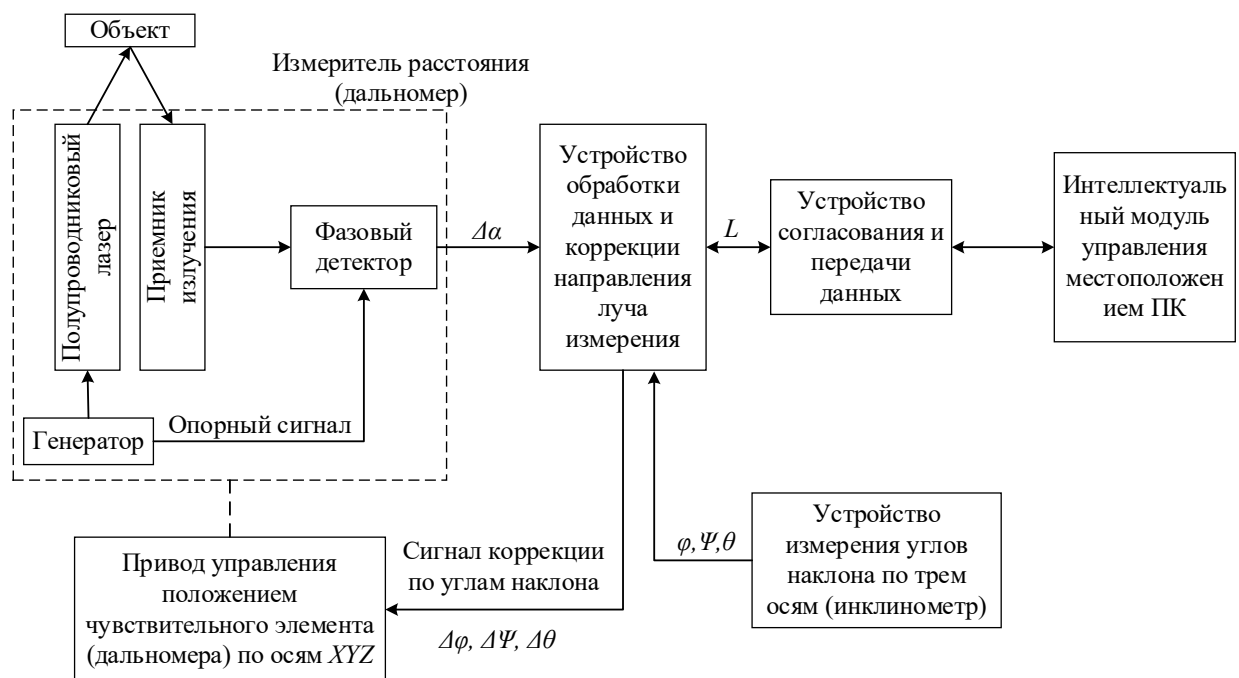


Рисунок 5.1 – Структурная схема устройства измерения расстояния с коррекцией углов наклона по осям

Фазовые лазерные дальномеры имеют ошибку на доли длины волны, соответствующей частоте модуляции, поэтому намного точнее импульсных, а также дешевле, т.к. не имеют сверхточного таймера. Однако необходимость более длительной подсветки цели уменьшает мощность лазера и, как следствие, дальность работы прибора.

Принцип действия фазового лазерного дальномера основан на измерении сдвига фаз между излучаемым сигналом и сигналом на приемнике в зависимости от измеряемого расстояния. На выходе такого измерителя появляется сигнал сдвига фаз $\Delta\alpha$, который преобразуется устройством обработки данных и коррекции направления в параметр измеренного расстояния L .

Задача угловой коррекции плоскости измерения решается путем введения цифрового 3-трехосевого инклинометра, на выходе которого формируются значения углов наклона корпуса комбайна φ , ψ , θ по осям XYZ системы координат выработки. По рассогласованию показаний инклинометра с заданными значениями выдается корректирующее воздействие на шаговые двигатели привода управления положением чувствительного элемента.

Измеренные данные расстояния до объекта L передаются в виде пакетов при помощи устройства согласования и передачи данных по согласованному протоколу в систему позиционирования проходческого комбайна.

Алгоритм работы устройства измерения расстояния (дальномера) в соответствии с разработанным методом (п.4.2 данного исследования) представляет собой циклическое выполнение последовательных операций во время и после передвижки проходческого комбайна, состоит из двух этапов и представлен на рисунке 5.2.

На первом этапе выполнения алгоритма происходит выставление плоскости измерения параллельно почве. Задание исходных углов ориентации проходческого комбайна в пространстве выработки $(\varphi_0, \psi_0, \theta_0)$, допустимого отклонения δ и количества измерений m происходит в блоке 2. Опрос инклинометра на этом этапе происходит для получения текущих значений углов наклона корпуса комбайна (φ, ψ, θ) (блок 3).

Далее в блоке 4 и 5 происходит определение рассогласования между заданным значением угла наклона плоскости и измеренным и сравнение со значением допустимого отклонения δ . При превышении указанного значения выдается сигнал соответствующему шаговому двигателю привода управления положением чувствительного элемента (ЧЭ) (блок 6). Действие 4 – 6 производится до устранения рассогласования.

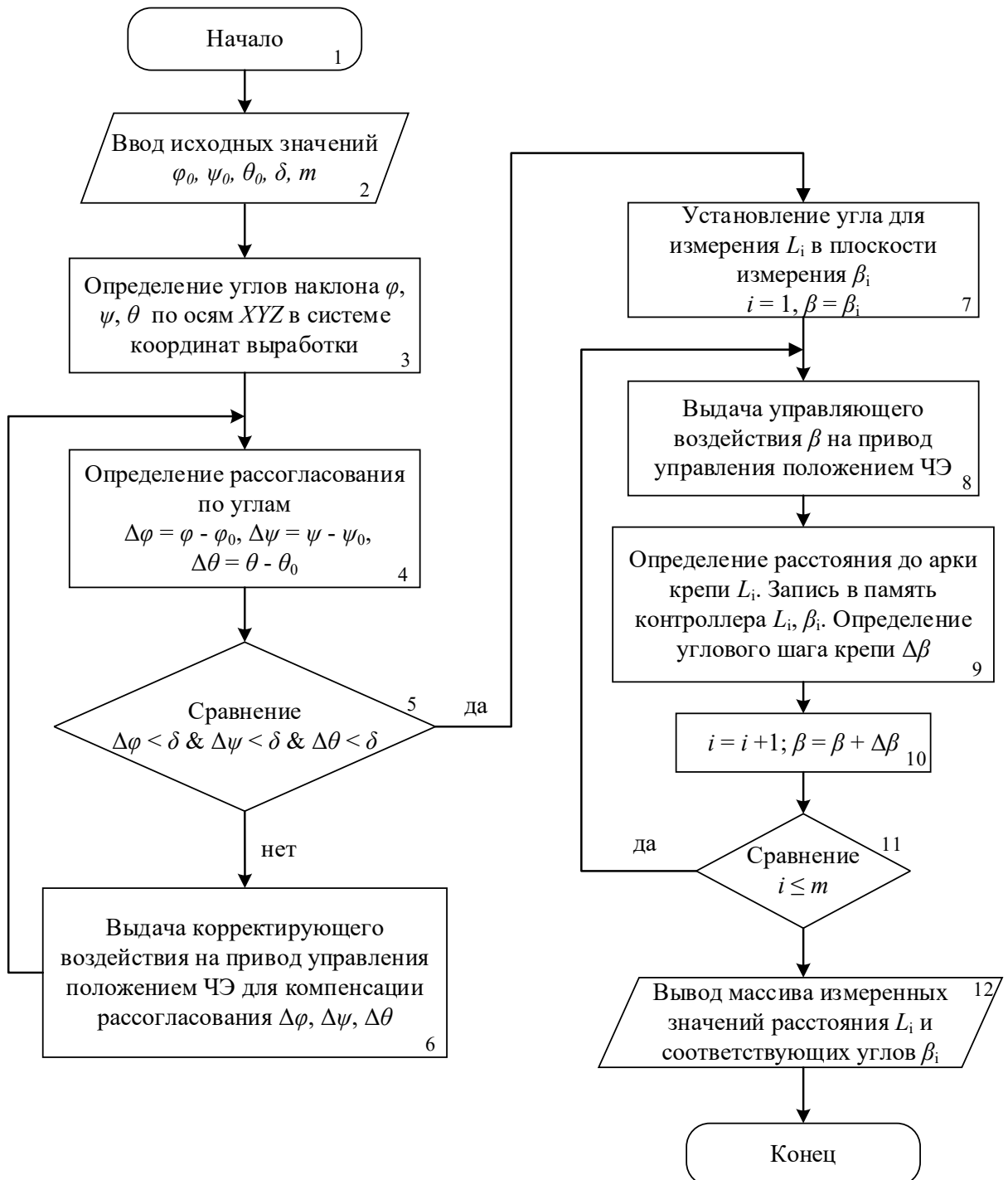


Рисунок 5.2 – Алгоритм работы устройства измерения расстояния (дальномера)

На этапе 2 производится цикличное измерение N расстояний от вертикальной оси поворота ЧЭ до арки крепи L . После каждого измерения в память контроллера записывается пара значений L_i и β_i . После окончания цикла массив значений расстояний и углов поворота ЧЭ выдается в систему позиционирования проходческого комбайна для обработки. Алгоритм выполняется по запросу системы позиционирования проходческим комбайном.

5.2 Структура и алгоритм работы системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа

Система позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа должна являться комплектующим изделием проходческой машины и предназначена для совместной работы с штатной системой управления проходческим комбайном, имеющей возможность передачи данных по стандартному протоколу (интерфейс RS-485).

Особенности построения структуры системы позиционирования продиктованы необходимостью определения шести параметров местоположения комбайна и коронки его исполнительного органа в пространстве выработки – трех линейных координат и трех углов поворота.

На рисунке 5.3 представлена структурная схема системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа в координатах выработки в составе: дальномер левый №1, дальномер правый №2, инклинометр №1 корпуса ПК, инклинометр №2 стрелы ПК, устройство согласования, интеллектуальный модуль управления местоположением ПК, блок хранения данных местоположения после каждой передвижки.

Принцип действия дальномера с коррекцией угла наклона ЧЭ описан в п.5.1.

Инклинометр подбирается трех-осевой цифровой с выходом в виде трех угловых координат по осям XYZ .

Устройство согласования представляет собой концентратор, который синхронизирует опрос датчиков и передачу данных.

Основным в структуре системы позиционирования является интеллектуальный модуль управления местоположением ПК. Это устройство должно быть реализовано на основе промышленного контроллера со специальным программным обеспечением, выполняющим следующие функции:

- обработка угловых координат и массивов данных об измеренных расстояниях до арок крепи слева и справа от корпуса комбайна;
- определение текущего положения корпуса комбайна и стрелы его ИО в системе координат выработки;
- определение координат контура выработки в неподвижной системе координат;
- выдача корректирующих воздействий в систему управления комбайном для минимизации смещения корпуса относительно продольной оси выработки;
- выдача сигнала на отключение подачи ИО в горизонтальной и вертикальной плоскостях при выходе коронки ИО за пределы заданного контура с учетом данных о текущем смещении корпуса и углах его поворота по трем осям;
- запись и хранение данных в память блока хранения данных о координатах всех стоек арочной крепи в выработке, расстоянии между стойками, положении комбайна и средней линии выработки, углах наклона в разных частях выработки, хранение массивов измеренных данных для каждой передвижки.

Для реализации своих функций интеллектуальный модуль управления местоположением ПК имеет в составе программного обеспечения три программных блока: «Определение местоположения корпуса и стрелы ПК», «Коррекция местоположения», «Формирование контура выработки». Эти программные блоки реализуют метод определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки при помощи алгоритмов и математических моделей, описанных в п.4.2 и способ позиционирования коронки ИО проходческого комбайна в системе координат выработки, описанный далее в п. 5.3.

Система позиционирования питается от штатного источника питания аппаратуры управления проходческим комбайном или от источника питания собственных нужд в станции управления.



Рисунок 5.3 – Структурная схема системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его ИО в координатах выработки

Алгоритм работы системы. После каждого цикла обработки забоя производится передвижка проходческого комбайна на глубину зарубки исполнительного органа. При этом определяется местоположение проходческого комбайна в системе координат выработки.

Задача позиционирования проходческого комбайна в выработке решается путем введения в систему позиционирования трех устройств: двух дальномеров с изменяемым углом наклона измерительного луча, расположенных на левой и правой стенке корпуса проходческого комбайна, и цифрового трех-осевого инклинометра, расположенного в любой части корпуса.

Алгоритм работы дальномера представляет собой циклическое выполнение последовательных операций после передвижки проходческого комбайна, состоит из двух этапов. На первом этапе выполнения алгоритма происходит выставление плоскости измерения параллельно почве. Для этого на выходе инклинометра формируются значения углов наклона корпуса комбайна по осям XYZ в цифровом виде. Данные выдаются в устройство согласования для первичной обработки и формирования общего пакета данных. Блок согласования передает данные от инклинометра №1 о наличии углов наклона корпуса относительно осей XYZ неподвижной системы координат выработки. По рассогласованию показаний инклинометра с заданными значениями интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна выдает корректирующее воздействие на шаговые двигатели привода управления положением дальномера. По данным инклинометра определяется также угол поворота корпуса проходческого комбайна. Интеллектуальный модуль управления местоположением ПК выдает корректирующее воздействие в систему управления проходческим комбайном. Корректировка угла поворота корпуса комбайна производится при превышении заданного угла поворота.

На втором этапе после корректировки углов наклона луча левого и правого дальномера производится от четырех до восьми измерений расстояния до стоек постоянной крепи. Измерение расстояния производится с угловым шагом, соответствующим шагу крепления выработки. Количество измерений и шаг

установки стоек крепления выработки задается настройками системы до начала работы. Измеренные значения расстояния и соответствующие им углы поворота луча левого и правого дальномера передаются в устройство согласования и передачи данных и далее по согласованному протоколу в интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна.

Интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна по полученным данным от левого и правого дальномеров определяет расстояние от продольной оси выработки до каждой стойки крепи по нормали. При этом вычисляются координаты каждой стойки крепи в неподвижной системе координат выработки, положение средней линии выработки, смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки, ширина выработки по стойкам крепи. По окончании вычислений присваиваются номера стойкам крепи, и все полученные данные заносятся в базу данных, которая находится в блоке хранения данных местоположения.

При превышении смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки заданного значения интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна выдает по цифровому интерфейсу команду в штатную систему управления проходческим комбайном на изменение местоположения проходческого комбайна в выработке с учетом смещения и поворота корпуса в плоскости почвы выработки.

Задача позиционирования коронки исполнительного органа проходческого комбайна и задания контура выработки решается введением дополнительного инклинометра №2, который размещается на корпусе стрелы исполнительного органа и подключается к устройству согласования. Данные о наклоне стрелы исполнительного органа по трем осям передаются через устройство согласования в интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна, который производит пересчет углов наклона в координаты основания коронки исполнительного органа в неподвижной системе координат выработки. После этого производится расчет ограничивающих углов подъема и поворота

стрелы исполнительного органа. Конструктивные параметры проходческого комбайна и форма выработки задаются в настройках системы до начала работы.

По результатам вычислений интеллектуальный модуль управления местоположением проходческого комбайна формирует команду на отключение подачи исполнительного органа в горизонтальной плоскости при превышении угла поворота стрелы для исключения выхода коронки за ограничительный контур выработки и для минимизации переборов породы. После передвижки проходческого комбайна цикл повторяется.

5.3 Позиционирование коронки ИО проходческого комбайна в системе координат выработки

На основе математической модели определения координат резца исполнительного органа, представленной в п.3.2, предложена схема расчета на примере проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой КСП-35 с учетом особенностей конструкции, представленная на рисунке 5.4. Схема используется для определения координат коронки ИО проходческого комбайна в забое в системе координат выработки, определения необходимых углов доворота ИО при смещении относительно продольной оси выработки или повороте машины во время работы относительно вертикальной оси, введения ограничивающих уставок по желаемой форме забоя, формирования корректирующих воздействий для сохранения формы и направления проводимой выработки.

Предложенная расчетная схема позволяет определить положение коронки исполнительного органа проходческого комбайна в любой момент времени в системе координат выработки с учетом подъема и поворота стрелы, смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки и изменения углов наклона по осям $X_1Y_1Z_1$.

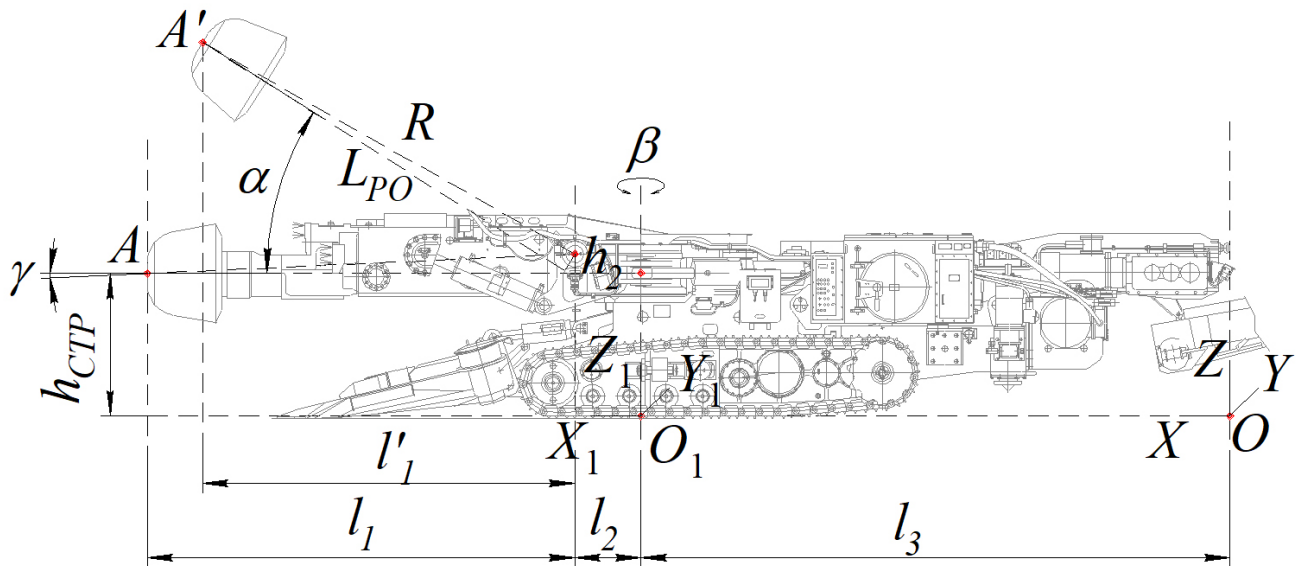


Рисунок 5.4 – Схема расчета координат коронки ИО проходческого комбайна

Для расчетной схемы, представленной на рисунке 5.4, введены следующие системы координат: $OXYZ$ – неподвижная система координат, связанная с выработкой, ось OX совпадает с продольной осью выработки; $O_1X_1Y_1Z_1$ – локальная подвижная система координат, связанная с проходческим комбайном, ось O_1Z_1 совпадает с осью поворотной турели, ось O_1X_1 совпадает с продольной осью комбайна. На рисунке 5.4 приняты следующие обозначения: A – вершина коронки ИО проходческого комбайна; l_1 , l_2 , – проекции расстояний между шарнирами поворота, подъема и вершиной коронки на продольную ось O_1X_1 ; l_3 – проекция расстояния между системами координат на продольную ось выработки OX ; R – радиус подъема коронки исполнительного органа в вертикальной продольной плоскости; L_{PO} – конструктивная длина стрелы ИО комбайна; h_2 – расстояние по нормали между осью коронки ИО и осью подъема стрелы; α – угол подъема стрелы; β – угол поворота стрелы; γ – конструктивный угол между осью вращения коронки и радиусом подъема стрелы относительно шарнира.

Для определения координат точки A в пространстве локальной и глобальной систем координат, формирования ограничивающего контура выработки и определения ограничивающих углов поворота стрелы ИО при обработке забоя разработана математическая модель.

Положение корпуса проходческого комбайна в пространстве выработки описывается шестью параметрами – тремя координатами поступательного движения по осям и тремя углами поворота Эйлера относительно осей X_1, Y_1, Z_1 локальной системы координат (рысканье, тангаж, крен). Искомым является определение местоположения точки A в локальной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$ комбайна и перевод полученных значений в систему координат выработки $OXYZ$.

Для определения проекций на ось O_1X_1 и координат точки A при помощи конструктивных параметров комбайна используются следующие зависимости:

$$R = \sqrt{h_2^2 + L_{\text{PO}}^2}, \quad (5.1)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{L_{\text{PO}}^2 + R^2 - h_2^2}{2 \cdot L_{\text{PO}} \cdot R}\right) \quad (5.2)$$

Координаты точки A ($A_{x1}; A_{y1}; A_{z1}$) в локальной системе координат определяются из зависимостей:

$$\begin{cases} A_{x1} = R \cdot \cos(\alpha - \gamma) \cdot \cos \beta + L_{\text{ш}} \cdot \cos \beta \\ A_{y1} = (L_{\text{ш}} + R \cdot \cos(\alpha - \gamma)) \cdot \sin \beta \\ A_{z1} = R \cdot \sin(\alpha - \gamma) + h_2 + h_{\text{PO}} \end{cases} \quad (5.3)$$

где $L_{\text{ш}}$ – конструктивное расстояние по нормали между шарнирами подъема и горизонтального поворота стрелы проходческого комбайна;

h_{PO} – расстояние между почвой и осью коронки ИО при $\alpha = 0$.

Положение локальной системы координат с привязкой к оси поворотной турели, указанное на рисунке 5.4, принято произвольно. Локальная система координат может быть привязана к расположению датчика углов поворота по трем осям (инклинометра) в объеме корпуса проходческого комбайна, для чего в систему уравнений (5.3) вносятся соответствующие поправки по осям.

Локальная система координат с началом в точке O_1 имеет следующие параметры, описывающие ее положение в пространстве выработки:

$$O_1(O_{1x}, O_{1y}, O_{1z}, \varphi, \theta, \psi) \quad (5.4)$$

где O_{1x}, O_{1y}, O_{1z} – координаты точки начала по осям локальной подвижной системы координат в системе координат выработки;

φ, θ, ψ – углы прецессии, нутации и собственного вращения соответственно.

Для определения координат точки A в неподвижной системе координат выработки необходимо ввести матрицу направляющих косинусов, определяющих комбинацию последовательных поворотов вокруг осей вращающейся системы координат. До и после поворота координаты точки в подвижной системе координат неизменны. Выходом является одномерная матрица координат коронки исполнительного органа проходческого комбайна в неподвижной системе координат выработки:

$$A(X, Y, Z) = R \cdot \begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{1x} \\ O_{1y} \\ O_{1z} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

где $R = R_z(\varphi) \cdot R_x(\theta) \cdot R_z(\psi)$ – матрица направляющих косинусов.

С помощью представленных зависимостей (5.1...5.5) в системе MathCAD проведены вычисления координат коронки ИО проходческого комбайна в локальной и глобальной системе координат с учетом смещения и углов его поворота по трем осям в пространстве выработки. Результаты вычислений координат коронки ИО проходческого комбайна представлены на рисунке 5.5 а (аксонометрия) и 5.5 б (вид сверху). Полученные данные позволяют определить граничные значения обрабатываемого забоя и возможность работы комбайна, не приводящей к нарушению формы забоя и изменению направления выработки при смещении или повороте в горизонтальной плоскости относительно продольной оси выработки.

При разрушении забоя коронка исполнительного органа описывает в про-

странстве локальной системы координат фигуру вращения с двумя изменяющимися параметрами – углом подъема и углом поворота стрелы ИО, ограниченными конструктивно на уровне $\sim 70^\circ$ и $\pm 45^\circ$ соответственно. Принятый в качестве примера проходческий комбайн согласно паспортным данным способен обработать с одной установки забой площадью до 28 м^2 без учета телескопичности ИО. Таким образом, при его использовании во время прохождения выработки $20,1 \text{ м}^2$ остается конструктивный запас по углам поворота и подъема, позволяющий компенсировать смещение машины и/или поворот относительно вертикальной оси.

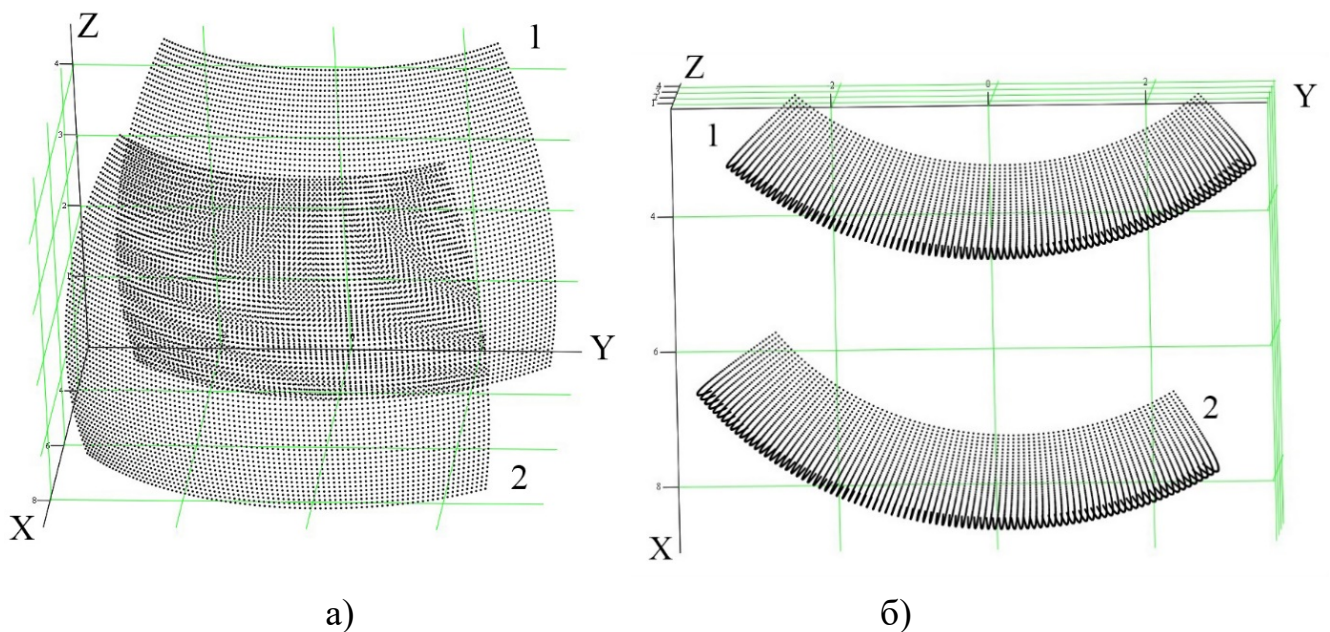


Рисунок 5.5 – Результаты вычислений координат коронки ИО проходческого комбайна

На рисунке 5.5 представлены результаты последовательного циклического пересчета координат движения коронки исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 при изменении углов поворота и подъема стрелы с шагом в один градус. Дополнительно введено смещение при передвижке $0,1 \text{ м}$ (координата O_{1Y}) влево относительно продольной оси выработки по ходу движения комбайна и поворот относительно оси Z на угол 10° (угол прецессии φ) по часовой стрелке. При этом расстояние по оси выработки между неподвижной системой координат выработки и локальной системой координат комбайна составляет 4 м (координата

O_1X). Цифрой 1 на обоих графиках обозначена область значений координат точки $A(X_1, Y_1, Z_1)$ в локальной подвижной системе координат $O_1X_1Y_1Z_1$. При смещении и поворотах комбайна относительно собственных осей координаты коронки в локальной системе координат неизменны. Цифрой 2 обозначена область значений координат точки $A(X, Y, Z)$ в неподвижной системе координат выработки $OXYZ$.

Как видно из рисунка 5.5, при повороте проходческого комбайна в горизонтальной плоскости во время частичной потери устойчивости изменяются границы обрабатываемого забоя проходческим комбайном. При достаточном конструктивном запасе после восстановления устойчивости необходимо ввести корректирующий угол доворота стрелы для сохранения контура и выбранного направления выработки и установить координаты границ выработки для минимизации переборов. Сходная задача решается при наличии смещения проходческого комбайна после передвижки относительно продольной оси выработки.

Введение ограничивающего контура выработки. Оптимизация перебора породы во время разрушения забоя предполагает задание требуемого контура выработки в виде массива координат коронки ИО, при которых образуются участки контура выработки при каждом подходе исполнительного органа к контуру выработки. При этом плоскость задания ограничивающих координат контура выработки перпендикулярна продольной оси выработки. Ограничивающий контур выработки может иметь любую заданную форму, для примера взята арочная форма, как наиболее сложная в исполнении.

Контур выработки арочного сечения задается функцией $y_{кв}(z)$, представленной на рисунке 5.6.

Контур выработки для арочной крепи задается зависимостями:

$$y_{кв}(z) = \begin{cases} \frac{B_B}{2} & \text{при } z \leq h_0 \\ \sqrt{\left(\frac{B_B}{2}\right)^2 - (z - h_0)^2} & \text{при } z > h_0 \end{cases}, \quad (5.6)$$

где B_B – ширина выработки;

h_0 – высота вертикальной стенки выработки.

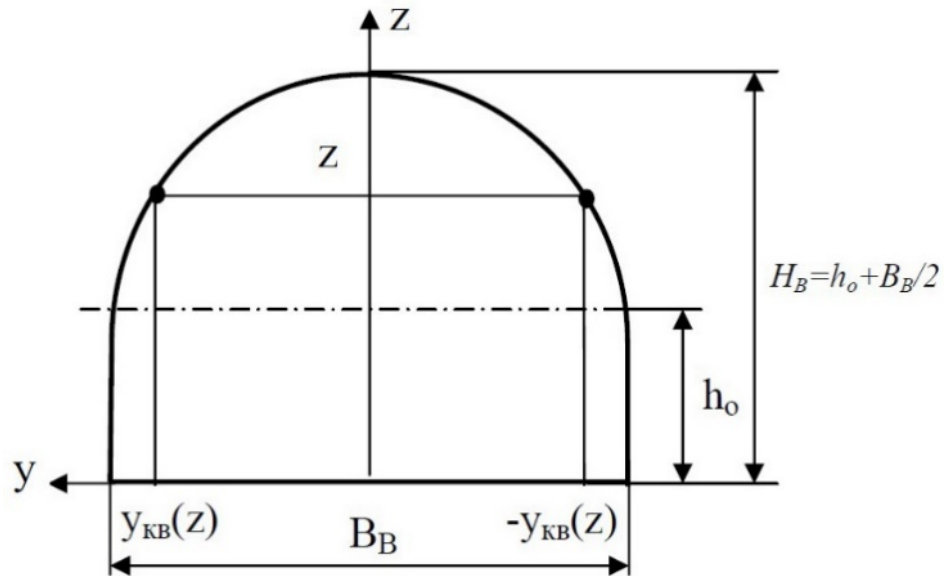


Рисунок 5.6 – Задание функции контура выработки арочной формы

При формировании ограничивающих координат по профилю выработки решается обратная задача преобразования координат неподвижной системы $OXYZ$ в координаты локальной подвижной системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$. Ограничивающие координаты выработки задаются значениями координат A_Y , вычисленными по (5.6) и A_Z – соответствующей высоты. Координата X является вспомогательной и соответствует смещению плоскости проекции координат относительно плоскости YOZ . Смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки после перемещения задается координатой O_{1Y} . Координаты коронки $A(X_1, Y_1, Z_1)$ в локальной системе координат вычисляются в два приема следующим образом:

$$(X_1, Y_1, Z_1) = R^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} X \\ A_y \\ A_z \end{array} - \begin{array}{c} O_{1x} \\ O_{1y} \\ O_{1z} \end{array} \right] \quad (5.7)$$

где R^{-1} – обратная матрица направляющих косинусов

Координата X_1 после вычисления по (5.7) не используется. Полученные значения координат $Y_1 = A_{Y1}$ и $Z_1 = A_{Z1}$ коронки ИО позволяют выразить из системы

(5.3) и определить значения ограничивающих углов α и β поворота стрелы в радианах и вычислить соответствующие координаты A_{X1} коронки:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{A_{Z1} - h_2 - h_{PO}}{R}\right) + \gamma, \quad (5.8)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{A_{y1}}{L_{III} + R \cdot \cos(\alpha - \gamma)}\right). \quad (5.9)$$

На рисунке 5.7 представлены результаты вычисления на основе (5.6-5.9), координат ограничивающего контура выработки (область значений 3) и соответствующих ему координат коронки ИО (область значений 4), обеспечивающих точность обработки проходческого забоя независимо от углов поворота проходческого комбайна в процессе работы или от смещения вбок от продольной оси выработки.

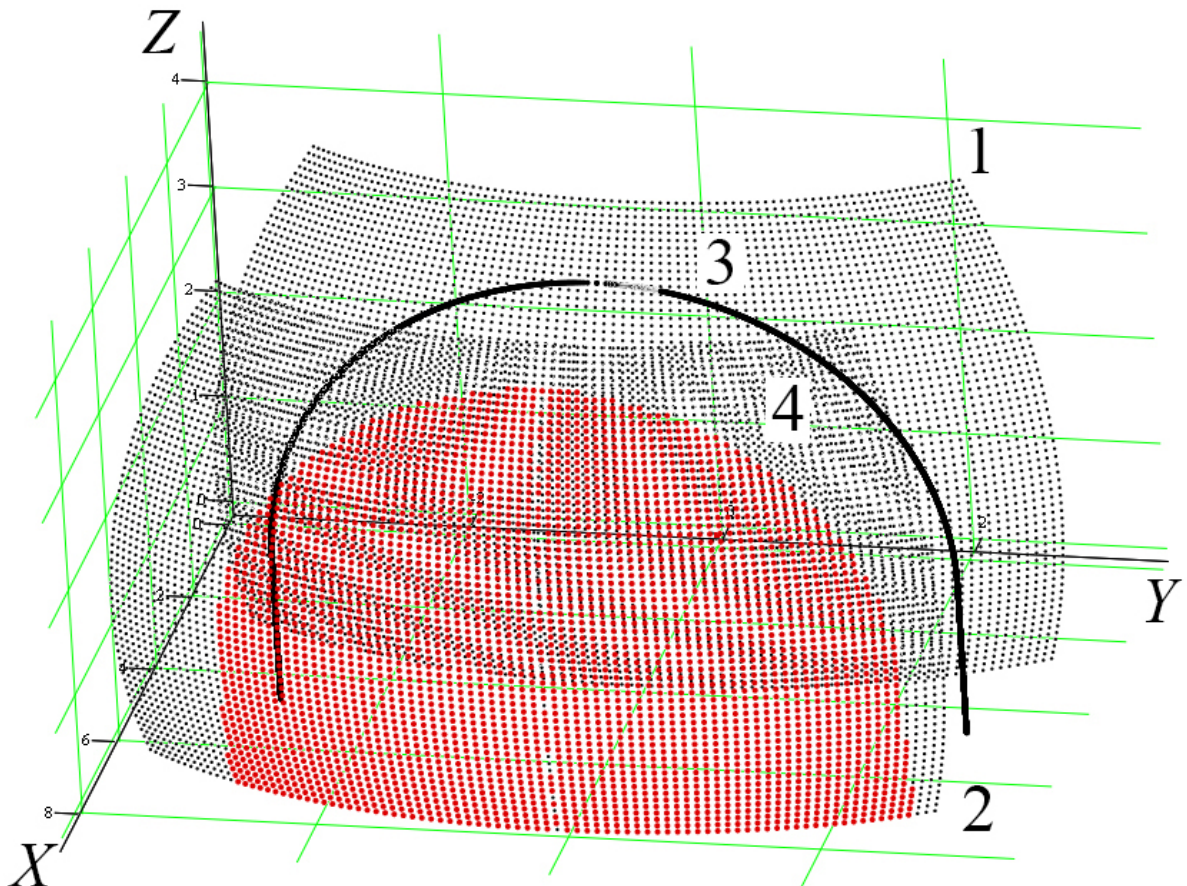


Рисунок 5.7 – Формирование ограничивающего контура выработки при вычислении координат коронки ИО

Как видно из рисунка 5.7, при смещении или повороте проходческого комбайна относительно одной из осей ориентации в пространстве выработки изменяются граничные значения обрабатываемого забоя. При повороте комбайна относительно оси O_1Z_1 или при смещении в горизонтальной плоскости XOZ достаточно введения корректирующего угла доворота стрелы в соответствующем направлении в горизонтальной плоскости, ограниченного значением β , вычисленного по (5.7). При изменении угла наклона по двум осям необходимо введение корректирующих углов, как подъема $\Delta\alpha$, так и поворота $\Delta\beta$ для сохранения контура выработки.

Разработанная в соответствии с предложенной расчетной схемой математическая модель позволяет определить координаты коронки ИО по трем углам поворота Эйлера локальной системы координат. При использовании углов последовательного поворота по осям X_1, Y_1, Z_1 вычисления производятся аналогично с использованием соответствующей матрицы направляющих косинусов. Координаты точки O_1 локальной системы координат в системе координат выработки $OXYZ$ определяются системой позиционирования комбайна в выработке.

Процесс остановки исполнительного органа после подачи сигнала в систему его управления сопровождается дополнительными перемещениями исполнительного органа, обусловленными инерционными свойствами системы его подачи. Для проходческого комбайна величина этих перемещений может составлять 20-55 мм в зависимости от контактной прочности разрушаемой породы (100-1000 МПа), с увеличением которой величина перебора породы уменьшается.

Предложенная схема расчета координат коронки исполнительного органа проходческого комбайна в системе координат выработки с учетом смещения относительно продольной оси выработки позволяет в дополнение к методу позиционирования комбайна рассчитывать необходимый контур выработки, определять корректировочные и ограничивающие углы подъема и поворота стрелы в зависимости от углов крена, тангажа и рыскания комбайна и смещения после передвижки.

Величина перебора зависит от инерционности управляющей системы, инерционности самого комбайна и его исполнительного органа, а также от физико-механических свойств горного массива. Учет запаздывания в отработке управляющих сигналов может быть произведен на основе интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки (рисунок 5.7), позволяющим предсказывать момент подхода коронки к проектному контуру выработки и останавливать ее подачу с некоторым опережением этого момента.

5.4 Выводы по разделу 5

1. Разработана структура и алгоритм работы устройства измерения расстояния с коррекцией углов наклона по трем осям, содержащая фазовый лазерный дальномер, устройство обработки данных и коррекции направления луча измерения, устройство согласования и передачи данных, привод управления положением чувствительного элемента и устройство измерения углов наклона по трем осям, **отличающаяся** повышенной точностью измерения по сравнению с импульсными дальномерами, измерением углов наклона измерительного луча по трем осям XYZ и возможностью коррекции углов наклона для обеспечения параллельности плоскости измерения и почвы. Алгоритм работы устройства разбит на два этапа и предполагает на первом этапе корректировку направления измерительного луча с заданной точностью, а на втором – циклическое измерение расстояния до объекта заданное число раз.

2. Разработана структура и алгоритм работы системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа, содержащая два дальномера – левый и правый – с изменяемыми углами наклона измерительного луча по трем осям, закрепленные на левой и правой стенках корпуса проходческого комбайна соответственно, одним инклинометром, расположенным в любой части корпуса проходческого комбайна и одним инклинометром, расположенным в любой части корпуса стрелы проходческого комбайна, подключенными через устройство согласования к интеллектуальному модулю управления

местоположением ПК, с блоком хранения данных местоположения проходческого комбайна, подключенным к интеллектуальному модулю управления местоположением проходческого комбайна, соединенная с системой управления проходческим комбайном по цифровому интерфейсу, **отличающаяся тем**, что при передвижке проходческого комбайна производится поочередное измерение расстояния до стоек постоянной крепи горной выработки слева и справа от корпуса проходческого комбайна, перед определением местоположения производится корректировка углов наклона измерительного луча дальномера для сохранения параллельности почвы и плоскости измерения, перед определением местоположения производится корректировка угла поворота корпуса проходческого комбайна в плоскости параллельной почве, по показаниям дальномеров вычисляются координаты корпуса, коронки исполнительного органа и стоек постоянной крепи в неподвижной системе координат горной выработки, определяется смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки, определяются координаты ограничивающего контура выработки, вычисляются ограничивающие углы подъема и поворота стрелы исполнительного органа проходческого комбайна с учетом смещения и поворота корпуса проходческого комбайна в пространстве выработки.

3. На основе предложенной расчетной схемы разработана математическая модель для определения координат коронки исполнительного органа проходческого комбайна в системе координат выработки, введения ограничивающего контура выработки и определения ограничивающих углов поворота и подъема исполнительного органа, **отличающаяся** формированием массива координат коронки исполнительного органа в системе координат выработки, проецированием полученных координат на плоскость перпендикулярную забою, формированием ограничительного контура выработки любой конфигурации независимо от положения корпуса комбайна по трем осям и обратным преобразованием полученных координат в допустимый массив значений угла подъема и поворота стрелы исполнительного органа. Математическая модель реализуется системой позиционирования проходческого комбайна и коронки его

исполнительного органа, позволяет более полно использовать структуру и реализовать функционал разработанной системы позиционирования, открывает возможности для дополнительных исследований. Принятые технические решения позволяют сохранять выбранное направление, форму обрабатываемого забоя и минимизировать переборы породы независимо от ошибок позиционирования проходческого комбайна в выработке, обусловленных ручным способом управления, и от изменения углов наклона корпуса по осям в процессе разрушения забоя.

Рассматриваемые в разделе вопросы доложены соискателем на международной научно-технической конференции [122].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для горной промышленности, заключающаяся в повышении эффективности работы проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой на основе разработанных методов и средств его позиционирования в выработке с учетом установленных закономерностей влияния положения комбайна относительно забоя на ресурс и производительность.

На основе результатов научных исследований, сформулированы следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации позволили выявить значительную неравномерность значений характеристик рабочего процесса комбайна, обусловленную смещением машины относительно продольной оси выработки вследствие погрешностей «ручного» управления (с вероятностью 0,95 значение средней мощности двигателя исполнительного органа за цикл обработки забоя находится в пределах 37,55-75,35 кВт, производительность – в пределах 0,13-0,33 м³/мин, а удельные энергозатраты – в пределах 2,05-6,61 кВт·ч/м³). В результате имеют место отклонения от рациональных режимов обработки забоя, недостаточное использование мощности привода, что приводит к повышению удельных энергозатрат на разрушение, а также снижение производительности комбайна и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа.

2. Разработана комплексная математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке, **учитывающая** влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, **которая состоит** из моделей разрушаемого массива

и поверхности забоя, определения координат вершины резца в забое, оценки условия контактирования резца с массивом, определения параметров процесса разрушения массива резцами коронки, **отличающаяся** формированием стружки с учетом предыдущих резов в текущем и предшествующем циклах обработки забоя и контакта резца с горным массивом, а также с учетом смещения комбайна относительно продольной оси выработки при его передвижке между циклами обработки забоя. Максимальное расхождение результатов сравнения интегральных показателей эффективности разрушения забоя проходческим комбайном при модельном и шахтном эксперименте не превысило $\pm 15\%$.

3. На основе модельных исследований рабочего процесса проходческого комбайна КСП-35 с осевой коронкой теоретически установлено:

– в результате смещения проходческого комбайна от оси выработки происходит существенное изменение глубины зарубки в процессе обработки забоя с явным смещением максимума в одну сторону. При этом диапазон изменения глубины зарубки при боковом резе находится в пределах от 0,1 до 0,63 м (для выработки сечением $20,1 \text{ м}^2$ и величины смещения 0,25 м). Это обуславливает снижение теоретической производительности проходческого комбайна до 43,7%, повышение удельных энергозатрат на разрушение и времени цикла обработки забоя соответственно до 64,1% и 56,6%, а также снижение ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа (для подшипников до 43%, валов и зубчатых колес до 64%) При этом с увеличением сечения выработки с 13 м^2 до $20,1 \text{ м}^2$ негативный эффект от смещения комбайна на производительность и удельные энергозатраты увеличивается и усугубляется при изменении шага фрезерования от $\Delta H = 0,4 \text{ м}$ до $\Delta H = 0,2 \text{ м}$;

– смещение комбайна относительно продольной оси выработки, обусловленное ручным принципом управления (в виду психофизиологических возможностей и квалификации оператора), на величину более 0,05 м приводит к существенному снижению эффективности функционирования комбайна при любом сочетании сечения выработки и шага фрезерования.

4. Предложен метод определения местоположения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки при помощи дальномера с изменяемым углом поворота луча, который позволяет определить отклонение проходческого комбайна от продольной оси выработки и сформировать корректирующее смещение после передвижки в реальном времени. Для реализации метода разработаны математическая модель и алгоритм, позволяющие уменьшить влияние разброса значений и погрешности измерений на формирование корректирующего смещения комбайна. Необходимым и достаточным условием реализации необходимой точности позиционирования в пределах заданного коридора является оснащение проходческого комбайна автоматизированной системой позиционирования, обеспечивающей точность определения расстояния до арок не хуже 0,5 % при количестве измерений равном 6. Предложенный метод позиционирования возможно применить при прохождении выработок разного сечения различными типами проходческих комбайнов с требуемой точностью позиционирования при сохранении точности измерения.

5. Разработана структура и алгоритм работы устройства измерения расстояния с коррекцией углов наклона по осям и системы позиционирования проходческого комбайна и коронки его исполнительного органа, учитывающие предложенный метод определения местоположения проходческого комбайна, **отличающаяся** тем, что при передвижке проходческого комбайна производится поочередное измерение расстояния до стоек постоянной крепи горной выработки слева и справа от корпуса проходческого комбайна, перед определением местоположения производится корректировка углов наклона измерительного луча дальномера для сохранения параллельности почвы и плоскости измерения, а перед определением местоположения производится корректировка угла поворота корпуса проходческого комбайна в плоскости параллельной почве, по показаниям дальномеров вычисляются координаты корпуса, коронки исполнительного органа и стоек постоянной крепи в неподвижной системе координат горной выработки, определяется смещение проходческого комбайна относительно продольной оси выработки, определяются координаты ограничивающего контура выработки,

вычисляются ограничивающие углы подъема и поворота стрелы исполнительного органа проходческого комбайна с учетом смещения и поворота корпуса проходческого комбайна в пространстве выработки.

6. Повышение технического уровня и эффективности работы проходческих комбайнов избирательного действия может быть достигнуто на базе разработанных методов и средств автоматизированного позиционирования комбайна в выработке на основе перманентного анализа информации от датчиков о параметрах рабочего процесса, обеспечивающей повышение теоретической производительности до 44% и ресурса элементов трансмиссии исполнительного органа до 64 %.

7. Результаты диссертационной работы были использованы институтами ГБУ «Донгипрошахт» и ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» при выполнении научно-исследовательской и проектно-конструкторской работ, приняты ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод» в качестве научно-методической основы для совершенствования проходческих комбайнов избирательного действия типа КСП, материалы исследования были включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выполнить анализ состояния и оценить перспективу развития шахтного фонда Министерства угля и энергетики ДНР до 2023 г. (2028 г.) / В.Н. Болбат, Н.П. Антипова, П.П. Шведик [и др.] //Отчет о научно-исследовательской работе. – Донецк: ДонУГИ, 2019 г. – 309 с.
2. Разрушение углей и пород. Сборник статей /Под ред. А.М. Терпигорьева, М.М. Протодьяконова. – Москва: Углетехиздат, 1958. – 512 с.
3. Резание угля / А.И. Берон, А.С. Казанский, Б.М. Лейбов, Е.З. Позин.– Москва: Госгортехиздат, 1962.– 240 с.
4. Резание углей / Под общей ред. А.И. Берона. – Москва: Изд–во литературы по горному делу, 1962. – 439с.
5. Позин, Е.З. Разрушение сланцев инструментами выемочных машин / Е.З. Позин, А.П. Адамсон, В.А. Андреев – Москва: Наука, 1984. – 144с.
6. Барон, Л.И. Разрушение горных пород проходческими комбайнами / Л.И. Барон, Л.Б. Глатман, Е.К. Губенков – Москва: Наука. 1968.– 218 с.
7. Разрушение углей выемочными машинами / Под ред. Е. З. Позина.– Москва: Недра, 1984.– 288 с.
8. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев – Москва: Недра, 1990. – 256 с.
9. Экспериментальные исследования сортности углей при резании с различными параметрами сечения среза и геометрии инструмента / В.Г. Унгефуг, В.П. Зейферт, В.Ф. Орлов, Р.И. Урбанс // В сб.: Вопросы механизации в горной промышленности, вып. 27.– Москва: Недра, 1971.
10. Туяхов, Л.С. Исследование и моделирование динамической нагруженности режущего инструмента и барабанных (шнековых) исполнительных органов угольных комбайнов: Дис. ... канд. техн. наук . – Москва, 1974. – 215 с.
11. Позин, Е.З. Анализ структурных особенностей процесса резания углей применительно к моделированию динамических нагрузок на ЭЦВМ /Е.З. Позин,

Л.С. Туяхов // Научн.сообщ. ин-та горн. дела им. А.А. Скочинского.– Москва: Ин-т горн. дела им. А.А. Скочинского, 1973. – Вып.113. – С. 91–100

12. Тон, В.В. Исследование нагрузок на резцах для узкозахватных угледобывающих комбайнов: Автореф. дис. канд. техн. наук. –Москва: Ин-т горн. дела им. А.А.Скочинского,1971 . – 18 с.

13. Албул, И.Н. Исследование и разработка метода расчета максимальных нагрузок на резцах угледобывающих комбайнов при разрушении твердых включений: Автореф. дис. канд. техн. наук . – Москва, 1978. – 21 с.

14. Позин, Е.З. Сопротивляемость углей разрушению режущими инструментами Отв. ред. А.И. Берон.– Москва: Наука, 1972.– 240 с.

15. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение тангенциальными инструментами. /Отв. ред. Л.И. Барон/ Москва, Наука, 1973. 171с.

16. Классификация по сопротивляемости резанию углей и угольных пластов основных бассейнов СССР. Краткий научный отчет. — Москва: ИГД им. А.А.Скочинского, 1970. — 40 с.

17. Исследование основных закономерностей резания калийных солей: Отчет / Тульск. политехн. ин-т; Руководитель И.Г. Шмакин; № ГР. 8011801; Инв. № Б288398.– Тула, 1973.– 126 с.

18. Исследование разрушаемости соляных пород в установившемся режиме резания с учетом влияния затупленности режущего инструмента: Отчет / ПермНИУИ; Руководитель Д.М. Светличный.– Пермь, 1964.

19. Бойко, М.Г. Експериментальні дослідження роботи очисних комбайнів. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 252с.

20. ОСТ 12.44.258–84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. Введен с 01.01.1986. – Москва: Минуглепром СССР, 1984. – 107 с.

21. ОСТ 12.44.197–81. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии

исполнительного органа. Введен с 01.07.1982. – Москва: Минуглепром СССР, 1981. – 48 с.

22. Берон, А.И. Методика определения содержания и свойств твердых включений в угольных пластах / А.И. Берон, Е.З. Позин, М.Ф. Кунтыш – Москва: ИГД им. А. А. Скочинского. 1971.– 19 с.

23. Кунтыш, М.Ф. Методы оценки свойств угольных пластов сложного строения / М.Ф. Кунтыш, Э.И. Баронская – Москва: Наука. 1980.– 143 с.

24. Докукин, А.В. Статистическая динамика горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин – Москва: Машиностроение, 1978. – 239 с.

25. Докукин, А.В. Аналитические основы динамики выемочных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин – Москва: Наука, 1966. – 60 с.

26. Докукин, А.В. Динамические процессы горных машин / А.В. Докукин, Ю.Д. Красников, З.Я. Хургин и др. – Москва: Наука, 1972. – 150 с.

27. Влияние неравномерности перемещения угледобывающего комбайна на формирование сил на задних гранях резцов шнековых исполнительных органов / Я.И. Альшиц, Г.В. Малеев, В.Г. Гуляев, Н.Г. Бойко, А.К. Семенченко // Изв. вузов. Горный журнал.– 1976.– № 6.– С. 77–82.

28. Бойко, Н.Г. Влияние неравномерности перемещения добычных комбайнов на толщину среза / Н.Г. Бойко, П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин // Изв. вузов. Горный журнал.– 1973.– № 1.– С. 65–68.

29. Бойко, Н.Г. Влияние конструктивной ширины режущей части резца на выбор параметров резания / Н.Г. Бойко, В.В. Нагорный // Изв. вузов. Горный журнал.– 1978.– № 11.– С. 65–67.

30. Бойко, Н.Г. Формирование сортового состава угля при добыче его очистными комбайнами: Монография / Н.Г. Бойко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2009. – 246 с.

31. Измерение составляющих усилий резания на резцах горных комбайнов / П.А. Горбатов, В.П. Кондрахин, Ю.А. Кривченко, Н.Н. Мотин // Механизация горных работ – Кемерово, КузПИ, 1988. – С.23–28.

32. Кондрахин, В.П. Идентификация усилия резания горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Хиценко // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо–електромеханічна. – 2001. – Вып.35. – С.38–47.

33. Бойко, Н.Г. Формирование мгновенных усилий на передних гранях резцов / Н.Г. Бойко, В.И. Игнатов // Известия вузов. Горный журнал, 1983. – №7. – С.77–79.

34. Бойко, М.Г. Очисні комбайни для тонких пологих пластів. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 476с.

35. Афендииков, Н.Г. Формирование составляющих усилий резания при разрушении глинистых и песчанистых сланцев резцами очистных комбайнов // Очистные и проходческие машины и инструменты: Межвузовский сб. / НПИ. – Новочеркасск, 1988. – С. 9–13.

36. Горбатов, П.А. Экспериментальные исследования закономерностей формирования фактических главных углов на резцах при работе очистного комбайна / П.А. Горбатов, В.П. Кондрахин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. – №3. – С. 105–108.

37. Горбатов, П.А. Имитационное моделирование динамических процессов в очистных комбайнах, функционирующих в автономных системах “комбайн – массив – конвейер” // Разработка месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. научно–техн. сб. – Киев: Техніка, 1991. – вып. 88. – С. 26 – 31.

38. Кондрахин, В.П. Имитационное моделирование процесса формирования нагрузок на резцах при резании горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Осипенко // Донецк: Сб "Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо–електромеханічна. – 2000. – Вып27 – С 161–168.

39. Бойко, Н.Г. Теория рабочих процессов комбайнов для добычи угля из тонких пологих пластов: Автореф. дис. ... докт. техн. наук . – Донецк, 1985. – 31 с.

40. Семенченко, Д.А. Влияние кинематических изменений заднего и переднего углов поворотного резца на формирование усилия подачи// Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо–електромеханічна. Донецьк – 2001. – Вып.27. – С.340–344.

41. Формирование вектора возмущения на шнековых исполнительных органах угледобывающих комбайнов / Я.И. Альшиц, Г.В. Малеев, В.Г. Гуляев, Н.Г. Бойко, А.К. Семенченко и др. // Изв. вузов, Горн. журн.– 1975.– № 10.– С. 103–107.

42. Горбатов, П.А. Закономерности формирования внешней нагрузки на исполнительном органе и динамические характеристики горного комбайна / П.А. Горбатов, В.П. Кондрахин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. – № 3. – С. 81–95.

43. Кондрахин, В.П. Имитационная модель процесса разрушения породы рабочими органами породоразрушающих машин // Сб. научн. трудов Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск. – 1998. – № 3, том 6. – С. 33–38.

44. Горбатов, П.А. Закономерности формирования толщины стружки, снимаемой резцом горного комбайна / П.А. Горбатов, В.П. Кондрахин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. – № 10. – С. 75–78.

45. Бурдин, В.Е. Исследование и разработка метода моделирования действующих нагрузок на шнековом исполнительном органе при разрушении угольного пласта сложного строения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1981. – 17 с.

46. Бойко, Н.Г. Рациональная ширина среза и схема набора режущего инструмента исполнительных органов комбайнов для тонких пластов // Изв. вузов, Горн. журн.– 1983.– №2.– С. 76–79.

47. Кондрахин, В.П. О влиянии пространственных колебаний исполнительных органов комбайнов на измельчение угля / В.П. Кондрахин, В.Г. Гуляев, П.А. Горбатов // Уголь Украины. – 1996. – № 4. – С. 37–39.

48. Гуляев, В.Г. Определение удельных энергозатрат и вектора внешнего возмущения корончатого исполнительного органа проходческого комбайна в различных режимах обработки забоя / В.Г. Гуляев, Д.А. Семенченко // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо–електромеханічна. Донецьк – 2001. – Вип.35. – С.38–47.

49. Семенченко, Д.А. Влияние формы аксиальной коронки на формирование толщины стружки на резцах и энергозатраты разрушения при боковом резе // Сборник научных трудов, посвященный 45-летию ДГМИ, "Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке". Алчевск – 2002. С.268–273.

50. Гуляев, В.Г. Математическая модель и метод оптимизации параметров аксиальной коронки проходческого комбайна / В.Г. Гуляев, Д.А. Семенченко // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо–електромеханічна. Донецьк – 2002. – Вип.42. – С.74–83.

51. Семенченко, Д.А. Обоснование параметров оптимизации аксиальной коронки проходческого комбайна. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Сб. науч. трудов. – Донецк: ДонНТУ. – 2003. – Вып. 26.–С.65–69.

52. Красникова, О.Ю. Совершенствование методов расчета и снижения нагруженности привода исполнительного органа проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Москва, 1991. – 17 с.

53. Динамика проходческих комбайнов / В.А. Бренер, А.А. Каралюс, П.П. Палев, В.И. Солод.– Москва: Машиностроение, 1977. – 224 с.

54. Красникова, О.Ю. К вопросу повышения динамической устойчивости проходческого комбайна со стреловидным исполнительным органом / О.Ю. Красникова, И.М. Гусева // Процессы и средства разрушения угля и горных пород: Научные сообщения. – Москва: ИГД им. А.А. Скочинского, 1987. – С. 77–81.

55. Хургин, З.Я. Имитационная модель формирования нагруженности проходческого комбайна избирательного действия / З.Я. Хургин, А.Л. Крыловский // Научно–технические вопросы комплексной механизации горнопроходческих работ. Научные сообщения. – Москва: ИГД им. А.А. Скочинского, 1981. – Вып. 202. – С. 60–65.

56. Семенченко, А.К. Математическая модель резцового исполнительного органа / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, В.Л. Витковский // Сб. научн. трудов НГА Украины. – Днепропетровск: РИК НГА Украины. – №3, Т.6. – С.53–57.

57. Чернявская, Т.А. Влияние режимных параметров на техническую производительность проходческих комбайнов избирательного действия // Научные и технические проблемы проведения горных выработок. Научные сообщения. – Москва: ИГД им. А.А. Скочинского, 1980. – Вып. 190. – С. 15–18.

58. Исекеев, М.М. Разработка и обоснование расчетно-оптимизационной системы выбора параметров и анализа работы гидропривода проходческих комбайнов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06. – Москва, 1989. – 19 с.

59. Книссель, В. Возможности улучшения процесса отделения материала от массива режущими головками проходческих комбайнов избирательного действия / В. Книссель, Ф. Визе // Глюкауф. – 1981. – №20. – С. 10–18.

60. Горбатов, П.А. Теория функционирования и совершенствования очистных комбайнов как нелинейных динамических систем: Дис. ...докт. техн. наук.– Донецк, 1991. – 552 с.

61. Хиценко, А.И. Исследование влияния случайных составляющих усилий на резцах на нагруженность в подсистемах проходческого комбайна // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок. Сборник научных трудов. – Донецк: ОАО «НИИГМ им. М.М. Федорова». – 2005. – С. 290–296.

62. Математическая модель проходческого комбайна как пространственной многомассовой динамической системы переменной структуры / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Д.А. Семенченко, Э.В. Пролетович // Горный информационно–аналитический бюллетень. – Москва: Изд–во МГГУ, 2000. – №4. – С. 139–140.

63. Семенченко, А.К. Теоретические основы анализа и синтеза горных машин и процесса их восстановления как динамических систем / А.К. Семенченко, В.М. Кравченко, О.Е. Шабаев – Донецк: РВА ДонНТУ, 2002. – 302с.

64. Шабаев, О.Е. Техническая диагностика резцового исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, И.И. Бридун, Н.В. Хиценко; под

общ. ред. О.Е. Шабаева. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 200 с.

65. Петрушкин, Г.В. Исследование и выбор параметров привода стреловидного исполнительного органа высокопроизводительного проходческого комбайна. Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук, Донецк, ДПИ. – 1976, –20 с.

66. Палев, П.П. Нагруженность и усталостная долговечность привода исполнительного органа горнопроходческих комбайнов. Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06. – Новосибирск, 1983. – 45 с.

67. Крыловский, А.Л. Исследование и определение нагруженности трансмиссий исполнительного органа проходческих комбайнов избирательного действия. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Москва, 1983. – 17 с.

68. Кондрахин, В.П. Имитационное моделирование усилий резания и подачи при резании горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Хиценко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. – №2. – С.150-154.

69. Горбатов, П.А. Научные основы разработки мехатронических подсистем приводов исполнительных органов проходческих комбайнов // Горный информационно–аналитический бюллетень. – Москва: МГГУ, 2004. – С. 63–65.

70. Семенченко, А.К. Оценка эффективности способов регулирования нагрузки на привод резания комбайна типа П110 в условиях Донбасса / А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2004. – №2 – С. 109–115.

71. Семенченко, А.К. Актуальность применения регулируемой системы подачи исполнительного органа проходческого комбайна / А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Сборник научных трудов, посвященный 45– летию ДГМИ, "Перспективы развития угольной промышленности в XXI веке". – Алчевск: ДГМИ, 2002. – С. 180–185.

72. Хиценко, Н.В. Влияние кинематических изменений скорости подачи и глубины зарубки в массив исполнительного органа на эффективность работы проходческого комбайна // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк: ДонГТУ, 2002. – Вып. 23. – С. 151–156.

73. Хиценко, Н.В. Влияние параметров аксиальной коронки проходческого комбайна на ее максимальную скорость подачи / Н.В. Хиценко, Д.А. Семенченко // Горная электромеханика и автоматика. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – Вып. 73. – С. 110–116.

74. Мизин, В.А. Оценка влияния зазоров в шарнирах направляющих исполнительного органа на ресурс проходческого комбайна // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С. 140–148.

75. К определению исходных данных для расчета элементов горной машины на выносливость / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, А.А. Каплюхин, Д.А. Семенченко, В.А. Мизин // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С. 176–182.

76. Моделирование рабочего процесса проходческого комбайна с учетом зазоров в системе подвески исполнительного органа / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Д.А. Семенченко, Н.В. Хиценко, В.А. Мизин // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 113. – С. 231–237.

77. Мизин, В.А. Экспериментальные исследования нагруженности системы подвески исполнительного органа проходческого комбайна КПД // Наукові праці ДонНТУ. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 113. – С. 192–198.

78. Математическая модель вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке проходческого комбайна / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Д.А. Семенченко, Н.В. Хиценко // Наукові праці Донецького нац. 166 техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк, 2006. – Вип. 104. – С. 198–205.

79. Семенченко, Д.А. Обоснование параметров исполнительного органа проходческих комбайнов с аксиальными коронками. Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Донецк, 2003. – 158 с.

80. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке мехатронного проходческого комбайна / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 18(172), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С. 3–12.

81. Математическая модель рабочего процесса горной выемочной машины как мехатронного объекта / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Вісті Донецького гірничого ін-ту / Донецький національний технічний університет. – Донецьк, 2010. – №2. – С. 253–264.

82. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Н.И. Стадник // Горное оборудование и электромеханика. №10, 2010. – С.49 – 59.

83. Шабаев, О.Е. Исследование нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации / О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Вестник ДонНТУ. – 2018. – № 4(14). – С.34-40.
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36634500> (дата обращения 07.06.2024).

84. Войтюк, К.К. Оптимизация управления нагрузкой проходческих машин по критерию максимальной производительности // Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. №9. – Москва: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып. 9. – С. 61-73.

85. Горбатов, П.А. Особенности формирования структурных решений современных очистных комбайнов как сложных мехатронных систем / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Е.А. Воробьев // Сб. трудов Междунар. Конференции «Современные пути развития горного оборудования и технологий переработки минерального сырья». – Днепропетровск: НГАУ, 1997. – С.12–13.

86. Горбатов, П.А. Оптимальное проектирование очистных комбайнов как сложных систем / П.А. Горбатов, Н.М. Лысенко, Е.А. Воробьев // Горные машины и автоматика. – Москва: Машиностроение, 2001. – №6. – С. 9–13.

87. Горбатов, П.А. Горные машины и оборудование / П.А. Горбатов, Г.В. Петрушкин, Н.М. Лысенко – В 2-х т. Под общей ред. П.А. Горбатова. – Донецк: РИА ДонНТУ, 2003. – Т.1 – 295 с; Т.2 –201с.

88. Горбатов, П.А. Концептуальная характеристика сложных горных машин как мехатронных систем / П.А. Горбатов, В.В. Косарев, Н.И. Стадник // Наукові

праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. Випуск 104. – Донецьк, 2005. – С. 53–61.

89. Мехатронная система подачи исполнительного органа проходческого комбайна с интеллектуальным модулем воспроизведения контура выработки / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Проблемы эксплуатации оборудования шахтных стационарных установок: зб. наук. праць. – Донецьк: ВАТ "НДІГМ імені М.М. Федорова", 2008 – 2009. – Вип. 102–103. – С. 404–414.

90. Стадник, Н.И. Мехатроника в угольном машиностроении / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, В.П. Кондрахин // Горное оборудование и электротехника, выпуск 4 – Москва: 2007. –С.20–29.

91. Проектирование горных машин как мехатронных объектов / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, А.В. Мезников, В.П. Кондрахин // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования. – Донецк, 2008. – С. 133–145.

92. Принципы мехатроники при проектировании горных машин / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, А.В. Мезников, В.П. Кондрахин // Материалы международной конференции «Форум горняков – 2007». – Днепропетровск: НГУ, 2007. С. 7–17.

93. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «Управление-подача» исполнительного органа / О.Е. Шабаев [и др.] // Донецк: ДонНТУ, 2009. – 15 с.

94. Отличительные особенности машин современных механизированных комплексов / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, А.В. Мезников, В.П. Кондрахин // Решение научно-технических проблем при создании и внедрении современного горно-шахтного оборудования: Зб. наук. праць. – Донецьк: ГП Донгипроуглемаш, 2008. – Вип. 113. – С. 111–132.

95. Стадник, Н.И. Особенности и функциональная модель мехатронного очистного комплекса / Н.И. Стадник, А.В. Сергеев, В.П. Кондрахин // Горное

оборудование и электромеханика. Москва: Новые технологии, №5, 2008. – С. 32–40.

96. Злодеев, А.В. Повышение эффективности программной обработки забоя стреловыми комбайнами / А.В. Злодеев, В.В. Синенко, С.Е. Шумалинский // Автоматизация забойного оборудования: сб. научн. тр. – Москва: НПО «Автоматгормаш», 1984. – Вып. 9. – С. 57-60.

97. Курносов, В.Г. Автоматизация технологических процессов добычи угля – стратегическое направление повышения безопасности труда на шахте / В.Г. Курносов, А.Ю. Довгань // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – №S5-1. – С.413-421. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35099606> (дата обращения 07.06.2024).

98. О стратегии создания интеллектуальных роботизированных систем управления горношахтным оборудованием / В.Г. Курносов [и др.] // Уголь Украины. – 2014. – №1. – С.12-16.

99. Семькина, И.Ю. Подходы к созданию роботизированного проходческого комбайна в условиях безлюдной шахты / И.Ю. Семькина, А.В. Григорьев, А.Н. Гаргаев // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, 23-24.03.2017. –С. 202-205.

100. Jasiulek, D. Mechatronic systems in mining roadheaders-examples of solutions / D. Jasiulek, J. Świder // Pomiar Automatyka Robotyka. – 2013. – №1, 2013 – P.123-127

101. Jasiulek, D. An adaptive control system of roadheader with intelligent modelling of mechanical features of mined rock / D. Jasiulek, K. Stankiewicz // Institute of Mining Technology KOMAG, 2011. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 2 2011. – P.197-203.

102. Changqing, Y. A Multi-Sensor Based Road-header Positioning Model and Arbitrary Tunnel Cross Section Automatic Cutting / Y. Changqing, Z. Wenxiao, L. Xinming // Sensors. – 2019. – Iss.22. Vol.19. 4955.

103. Ultra-wideband pose detection method based on TDOA positioning model for boom-type road-header / S. Fu [et al.] // AEU Int. J. Electron. Commun. – 2019. – Vol.99. – P. 70-80.

104. Система позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А.А. Гуммель [и др.] // Кибернетика энергетических систем. Сборник материалов ХLI Международной научно-технической конференции, Новочеркасск, 15-17 октября 2019 г. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2020. – С. 350-355.

105. Halama, A. Wireless control and directional navigation of a roadheader in drilling process / A. Halama, P. Loska, P. Szymała// Pomiary Automatyka Robotyka, №2, 2013 – P.218-223

106. Visual measurement system for roadheaders pose detection in mines / Y. Du [et al.] // Optical Engineering. – 2016. – Iss.10. Vol.55. 104107.

107. Research on position and orientation measurement method for roadheader based on vision / J.Yang [et al.] // INS. In Proceedings of the 2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optoelectronic Measurement Technology and Systems, International Society for Optics and Photonics, Beijing, China, 12 January 2018. – P. 1062105.

108. Шевелев, И.М. Решение задачи одометрического позиционирования горно-выемочной машины под землей посредством применения фильтра Калмана / И.М. Шевелев, А.В. Затонский // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника», 2021.Т.21, №2. С. 123-135

109. Кориков, А.М. Ориентация горных технологических машин на основе микроэлектромеханических систем. / А.М. Кориков, Я.Е. Мещеряков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск, 2018. Т.21, №4. С.92-97

110. Садовец, В.Ю. Разработка требований к системе инерциального позиционирования горных машин / В.Ю. Садовец, Е.В. Резанова, Р.В. Садовец, А.К. Санников // Горное оборудование и электромеханика. 2022. №3 (161). С. 3-12.

111. Ломонос, Г.Т. Метод программного управления направленным движением проходческого комбайна / Донецкие чтения 2018: Образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы III Международной научной конференции. Том 1. Под общей редакцией С.В. Беспаловой. 2018. С.233-234

112. КСП-35 модификация 1 (56 т). // Официальный сайт ООО «НПО «Ясиноватский машиностроительный завод». URL: <https://ymzdn.ru/ksp-35-modifikatsiya-1/> (дата обращения: 14.02.2024)

113. Горнотехнические условия Донецкого угленосного бассейна. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglya/15199-gornotekhnicheskie-usloviya-doneckogo-uglenosnogo-basseyna.html> (дата обращения: 14.02.2024)

114. Шабаев, О.Е. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хищенко // Вісті Донецького гірничого ін-ту. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – №1. – С. 68-77.

115. Шабаев, О.Е. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 2 (22). С. 55–72. URL: <https://vestnik-tekh.ru/online/article/?article=588?article=588> (дата обращения 10.06.2024)

116. Довгань, А.Ю. Математическая модель для оценки контактирования резцов осевой коронки проходческого комбайна с забоем в процессе разрушения // Донбасс будущего глазами молодых ученых, г. Донецк, 23 ноября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С.6-10. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47467653> (дата обращения 07.06.2024)

117. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, А.Н. Махутов, А.П. Гусенков // Москва: Машиностроение, 1985. – 224 с., ил. – (Основы проектирования машин)

118. ГОСТ 25.101-83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. Межгосударственный стандарт. Расчеты и испытания на прочность.

119. Шабаев, О.Е. Влияние позиционирования проходческого комбайна КСП-35 в проходческом забое на эффективность его функционирования / О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Вестник ДонНТУ. – 2020. – №3(21). – С.35-42. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=44435108> (дата обращения 07.06.2024)

120. Довгань, А.Ю. Влияние смещения проходческого комбайна относительно оси выработки на его производительность и энергоэффективность / А.Ю. Довгань, О.Е. Шабаев // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДОННТУ, 2021. Т. 3: 5. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2021. – С.6-11. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47111986> (дата обращения 07.06.2024).

121. Шабаев О.Е. Способ позиционирования проходческого комбайна в выработке/ О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Вестник ДонНТУ. – 2021. – № 1(23). – С.11-19. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47145988> (дата обращения 07.06.2024)

122. Шабаев, О.Е. Оптимизация рабочего процесса обработки забоя проходческим комбайном с осевой коронкой/ О.Е. Шабаев, А.Ю. Довгань // Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции в г. Севастополь 13-19 сентября 2021 г. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – С.576-583.

Приложение А.

**Документы, подтверждающие эффективность использования результатов
работы**



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
(ФГБОУ ВО "ДонНТУ")**

Артёма ул., 58, г.Донецк, г.о. Донецкий, Донецкая Народная Республика, 283001 тел.: +7 (856) 337-17-33, 301-07-69
e-mail: donntu.info@mail.ru ОКПО 95580141 ОГРН 1229300078633 ИНН/КПП 9303013012/930301001

31.05.2024 № 30-12/7

На № _____

В диссертационный совет 24.2.491.02 при
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»

СПРАВКА

об использовании результатов исследований диссертационной работы Довганя Александра Юрьевича на тему «Повышение эффективности проходческого комбайна типа КСП-35 на основе обоснования структуры и параметров средств позиционирования», представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 «Геотехнология, горные машины», ФГБОУ ВО «ДонНТУ».

Полученные в диссертационной научно-исследовательской работе соискателя материалы были включены в учебный процесс ФГБОУ ВО «ДонНТУ» при изучении курсов:

«Моделирование рабочих процессов горных машин и оборудования» - математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на осевой коронке проходческого комбайна, учитывающая влияние горно-геологических условий и режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, позволяющая определять усилия резания и подачи на резце с учетом выполнения условия контакта резца с забоем;

«Аппаратура и методы экспериментальных исследований горных машин и оборудования» – методика обработки экспериментальных данных длительной записи нагрузочных характеристик электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна избирательного действия для оценки энергоёмкости и производительности процесса разрушения;

«Проектирование и конструирование горных машин и оборудования» – метод определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки, учитывающий смещение проходческого комбайна от средней линии и изменение углов наклона машины во время работы и после передвижки.

Проректор
д-р техн. наук, профессор

А.Б. Бирюков

Начальник учебно-методического управления
канд. техн наук, доцент

В.А. Попов

Заведующий кафедрой «Горные машины»
д-р техн. наук, профессор

О.Е. Шабаев



**YASINOVATSKY
MACHINE BUILDING PLANT**
RPA «YAMZ» LLC
INN 9307001995
KPP 930701001

Russian Federation, Donetsk People's Republic,
Yasinovataya, Artyoma str., 31
Ph.:+7(856) 364-28-00
e-mail: info@ymzdn.ru
www.ymzdn.ru



**ЯСИНОВАТСКІЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД**
ООО «НПО «ЯМЗ»
ИНН 9307001995
КПП 930701001

Российская Федерация, Донецкая Народная
Республика, м.о. Ясиноватский,
г.Ясиноватая, ул. Артема, 31
Тел.:+7(856) 364-28-00
e-mail: info@ymzdn.ru
www.ymzdn.ru

20.05.2024 № 027тоисх

В диссертационный совет Д 24.2.491.02
при ФГБОУ ВО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о передаче результатов исследований диссертационной работы Довганя Александра Юрьевича на тему **«Повышение эффективности проходческого комбайна типа КСП-35 на основе обоснования структуры и параметров средств позиционирования»**, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины».

Результаты работы приняты ООО «Научно-производственное объединение «Ясиноватский машиностроительный завод» в качестве научно-методической основы для совершенствования проходческих комбайнов избирательного действия типа КСП в виде:

- методики обработки экспериментальных данных длительной записи нагрузочных характеристик электродвигателя исполнительного органа проходческого комбайна избирательного действия для оценки энергоемкости и производительности процесса разрушения;
- показателей параметров рабочего процесса разрушения забоя исполнительным органом проходческого комбайна избирательного действия с осевой коронкой в представительных условиях его эксплуатации;
- обоснованных требований к точности позиционирования проходческого комбайна, обеспечивающих повышение его эффективности работы и надежности;
- метода определения положения проходческого комбайна в системе координат выработки;
- метода задания режимов обработки забоя, обеспечивающих требуемую форму выработки.

Предполагается, что использование результатов исследований диссертационной работы Довганя А.Ю. позволит в перспективе повысить эффективность проходческих комбайнов типа КСП, выпускаемых ООО «Научно-производственное объединение «Ясиноватский машиностроительный завод»

**Директор
производственного объединения
ООО «НПО «ЯМЗ»**



Ю.В. Мурай

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ГБУ «Донгипрошахт»



В.Н. Гулейчук

09 апреля 2024 г.

АКТ

**внедрения результатов исследования и рекомендаций
диссертационной работы**

Довганя А.Ю.

**«Повышение эффективности проходческого комбайна типа КСП-35 на
основе обоснования структуры и параметров средств
позиционирования»**

Настоящим подтверждается, что институтом «Донгипрошахт» при выполнении проекта «Подготовка к отработке уклонного поля пласта h₇ «Кащеевский» в разделе «Подготовка и система разработки» использованы решения и рекомендации А. Ю. Довганя, содержащиеся в его работе, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. Рекомендации по точности позиционирования проходческого комбайна, обеспечивающих повышение его эффективности работы и надежности.

2. Установление необходимого эффективного коридора для проходческого комбайна в выработке, позволяющего повысить производительность и снизить энергозатраты.

3. Методика определения допустимого поля координат коронки и формирования требуемого контура выработки любой формы, позволяющая снизить переборы породы по контуру выработки и затраты времени на забутовку.

4. Полученные зависимости производительности, удельных энергозатрат и ресурса от величины смещения проходческого комбайна относительно продольной оси выработки.

5. Метод определения местоположения проходческого комбайна в выработке.

Акт составлен для предъявления в ВАК Российской Федерации

Главный инженер проектов

(подпись)

В. А. Хрузин

ГКНТ ДНР

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ ГОРНЫХ
МАШИН «АВТОМАТГОРМАШ ИМЕНИ В.А. АНТИПОВА»
(ГУ «АВТОМАТГОРМАШ ИМ. В.А. АНТИПОВА»)

ОГРН 1229300016384 ИНН 9303002420

283003, Донецкая Народная Республика, Г.О. Донецк, г. Донецк, пр-т. Ильича, 93
тел. +7(949)331-09-14, e-mail: avtomatgormash@mail.ru

17.06.2024 № 3-212
На № _____ от _____

В диссертационный совет 24.2.491.02
ФГБОУ ВО «ДонНТУ»

СПРАВКА

об использовании результатов исследований диссертационной работы Довганя Александра Юрьевича на тему «**Повышение эффективности проходческого комбайна типа КСП-35 на основе обоснования структуры и параметров средств позиционирования**», представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности 2.8.8 Геотехнология, горные машины (технические науки).

Полученные в диссертационной научно-исследовательской работе соискателя материалы использованы ГУ «Автоматгормаш им. В.А. Антипова» при выполнении научно-исследовательской работы «Разработать комплекс средств управления нового технического уровня проходческими комбайнами типа КСП» по заказу Министерства образования и науки ДНР при выполнении разделов:

- Влияние фактора позиционирования на основные показатели работы проходческого комбайна;
- Экспериментальные исследования нагрузочных характеристик двигателя привода исполнительного органа проходческого комбайна КСП-35 в представительных условиях его эксплуатации».

Использование результатов исследований диссертационной работы Довганя А.Ю. позволили сформировать технические требования и требования назначения к Комплексу управления комбайнами КСП при разработке Технического задания на опытный образец (№30556266.01-2018). Полученные результаты диссертационной работы Довганя А.Ю. позволят в дальнейшем повысить показатели эффективности работы проходческих комбайнов за счет повышения точности его позиционирования в выработке.

Первый заместитель директора
по научной работе,
д-р техн. наук, профессор



Заведующий научно-исследовательским отделом
автоматизации горных машин

(Signature)
В.Г. Курносков

(Signature)
А.Ю. Карповский