На правах рукописи

Королев Александр Игоревич

ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ЗАБОЙНОГО ЗАРУБНОГО КОНВЕЙЕРА ОЧИСТНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА, АДАПТИВНОГО К ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ГИПСОМЕТРИИ ПЛАСТА

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор

Габов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты:

Жабин Александр Борисович
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра геотехнологий и строительства подземных сооружений, профессор;

Бочков Владимир Сергеевич
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», кафедра автоматики и компьютерных технологий, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится 24 июня 2022 г. в 10:30 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.
Автореферат разослан 22 апреля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета

ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Работа предприятий угольной отрасли характеризуется устойчивой тенденцией повышения интенсивности добычи угля в комплексно-механизированных очистных забоях. Повышение нагрузки на очистные забои приводит к увеличению размеров участков, нарезаемых к выемке, и, следовательно, к увеличению диапазона изменчивости горно-геологических условий по мере их отработки, ухудшению условий функционирования выемочного и транспортирующего оборудования.

Обеспечение производительной добычи угля в комплексно-механизированных очистных забоях с высоким коэффициентом использования оборудования по времени может быть достигнуто разработкой и внедрением адаптивных очистных механизированных комплексов, следовательно, адаптивного к этим переменным условиям забойного скребкового конвейера который является остовом механизированного комплекса, обеспечивающим направленное перемещение добычной машины, секций механизированной крепи, зачистку почвы в забое и транспортирование добытой угольной массы. Обоснование рациональной структуры забойных скребковых конвейеров, направленное на расширение их функциональных возможностей и на повышение их адаптивности к изменяющимся по мере отработки выемочных столбов горно-геологическим и технологическим условиям, будет способствовать устойчивому функционированию очистных механизированных комплексов в номинальных режимах работы, что является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие высокопроизводительных забойных скребковых конвейеров и в повышение эффективности их использования внесли многие ученые, конструкторы и практики, в частности: В. И. Галкин, В. М. Горлов, В. Н. Григорьев, В. Ю. Доброногова, В. Е. Домбровский, Е. К. Ещин, Р. Л. Зенков, С. В. Корнеев, В. С. Олейник, В. И. Парамонов, В. Д. Перский, Ю. С. Пухов, Н. Д. Самойлюк, А. О. Спиваковский, Ю. Ф. Тверезый, Ю. Д. Тарасов, Н. В. Тихонов, Л. Г. Шахмейстер и др.

Разработке перспективных конструкций и исследованию режимов работы приводов и тяговых органов скребковых конвейеров посвящены работы Я. Вэньчжэ, Г. В. Высоцкого,

Л. Н. Колобова, А. В. Леусенко, М. С. Озорнина, Н. С. Полякова, Г. И. Солода, Н. В. Чекмасова, Е. Е. Шишко, И. Г. Штокмана, Б. Шерфа, Б. А. Эйдермана и др.

Однако, до настоящего времени не нашли решения вопросы, связанные с обоснованием структуры и параметров забойных скребковых конвейеров, повышающих адаптивность очистных механизированных комплексов к переменным условиям по мере отработки выемочных участков, для чего необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель исследования – определение зависимостей показателей эффективности очистного комплекса от параметров забойного скребкового конвейера, адаптивного к переменным по мере отработки выемочного столба горно-геологическим условиям, необходимых для обоснования его схемных и конструктивных технических решений, обеспечивающих поддержание на заданном уровне интенсивности добычи угля в изменяющихся условиях эксплуатации за счет улучшения направленности перемещения комплекса.

Идея исследования заключается в расширении функциональных возможностей забойного скребкового конвейера, а именно: выполнение подрубки пласта и профилирования почвы, раздельного транспортирования угля и породы, в результате чего, улучшается направленность перемещений комплекса, обеспечивается регулирование интенсивности отжима пласта, что придает свойства адаптивности очистному механизированному комплексу в целом и повышает устойчивость его работы в рациональных режимах в переменных, по мере отработки выемочного столба, условиях функционирования.

Задачи исследования:

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи**:**

1. Провести анализ теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационной работы.
2. Выявить диапазон изменчивости горно-геологических и технологических условий в комплексно-механизированных очистных забоях по мере отработки выемочных участков, влияющих на эффективность выполнения функций забойных скребковых конвейеров.
3. Обосновать требования к забойному скребковому конвейеру, как элементу адаптивного очистного механизированного комплекса.
4. Установить влияние структуры и параметров забойных

скребковых конвейеров на эффективность функционирования очистных механизированных комплексов при работе в изменяющихся по мере отработки выемочных участков горно-геологических и технологических условиях.

5. Выполнить математическое моделирование процессов транспортирования горной массы и подрубки пласта забойным зарубным скребковым конвейером очистного механизированного комплекса.

6. Обосновать схемные и конструктивные решения забойного скребкового конвейера, обеспечивающего профилирование почвы пласта, как опорной и направляющей поверхности.

7. Обосновать рациональные параметры забойного зарубного конвейера очистного механизированного комплекса, адаптивного к изменяющимся, по мере отработки выемочного участка, условиям.

Научная новизна работы:

1. Обоснована структура и конструктивное техническое решение забойного зарубного скребкового конвейера с расширенными функциональными возможностями, адаптивного к изменяющимся по мере отработки выемочного столба условиям.

2. Разработана математическая модель и получены зависимости изменения производительности забойного зарубного скребкового конвейера от угла положения почвы отрабатываемого угольного пласта по простиранию, скорости перемещения тягового органа и шага расстановки скребков.

3. Установлены зависимости отклоняющего и восстанавливающего моментов, действующих на скребок, от угла установки его резца относительно почвы.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обосновано схемное техническое решение зарубного скребкового конвейера с расширенными функциональными возможностями, адаптивного к изменяющимся, по мере отработки выемочного столба, условиям.

2. Определена зависимость изменения угла естественного откоса транспортируемой угольной массы от скорости движения цепи забойного зарубного конвейера.

3. Определена зависимость производительности забойного зарубного скребкового конвейера от угла залегания угольного пласта, скорости перемещения цепи и шага расстановки скребков с учетом угла естественного откоса транспортируемой угольной

массы.

4. Обоснованы параметры режима работы забойного зарубного скребкового конвейера очистного механизированного комплекса, адаптивного к переменным, по мере отработки выемочного столба, условиям.

5. Определено влияние нагрузок, действующих на резец забойного зарубного скребкового конвейера в процессе профилирования почвы и подрубки пласта, на устойчивость движения одиночного скребка.

Методология и методы исследования

Научный анализ результатов ранее выполненных исследований процесса функционирования очистных механизированных комплексов для добычи угля в изменяющихся горно-геологических и технологических условиях; синтез структуры и обоснование параметров забойного зарубного скребкового конвейера; математическое и компьютерное моделирование процессов подрубки пласта и транспортирования горной массы при работе забойного зарубного скребкового конвейера.

Соответствие паспорту специальности

Тема исследования соответствует п. 3 «Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы машин и оборудования и их элементов» и п. 4 «Обоснование и выбор конструктивных и схемных решений машин и оборудования во взаимосвязи с горнотехническими условиями, эргономическими и экологическими требованиями» области исследований паспорта специальности 05.05.06 – Горные машины.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Устойчивость функционирования очистного механизированного комплекса и его базового элемента забойного скребкового конвейера в процессе добычи угля необходимо оценивать комплексным показателем устойчивости, который определяется произведением коэффициента устойчивости по скорости подачи (K_{yv}) на коэффициент устойчивости по времени (K_{yt}) и на относительное увеличение времени остановок (K_{yo}), а для забойного скребкового конвейера комплекса – произведением коэффициентов готовности забойного скребкового конвейера ($k_г$) и смежного оборудования очистного механизированного комплекса ($k'_г$) на коэффициенты использования конвейера по производительности ($k_и$) и по времени ($k_в$).

2. Разработанные структура и схемные конструктивные технические решения адаптивного забойного зарубного скребкового конвейера обеспечивают повышение устойчивости функционирования очистного механизированного комплекса в номинальных режимах в переменных, по мере отработки выемочного столба, горно-геологических и технологических условиях посредством выполнения подрубки и профилирования почвы пласта, раздельного транспортирования угля и породы, в результате чего улучшается направленность перемещений комплекса, осуществляется регулирование интенсивности отжима пласта и повышается качество добываемого угля по гранулометрическому составу.

3. С увеличением скорости движения тягового органа забойного зарубного скребкового конвейера от 1 до 2 м/с угол естественного откоса угольной массы, в пространстве между скребками, уменьшается по установленной полиномиальной зависимости, что уменьшает значение коэффициента использования конвейера по производительности.

Степень достоверности результатов работы

Научные положения, выводы и рекомендации, разработанные в диссертации, соответствуют основным представлениям в области конструирования и эксплуатации горных транспортирующих машин. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных методик расчета силовых и энергетических параметров работы скребковых конвейеров и режущих цепных исполнительных органов горных машин, использованием компьютерного моделирования процессов транспортирования угольной массы и подрубки пласта резцами забойного зарубного скребкового конвейера.

Апробация результатов работы

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на: Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» (г. Екатеринбург, 2016, 2019 гг.); Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (г. Тула,

2016 г.); Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, в формулировании задач и в разработке методик исследования, проведении анализа основных теоретических представлений о процессе функционирования забойного зарубного скребкового конвейера в составе очистного механизированного комплекса при добыче угля; в обосновании схемных решений и рациональных параметров забойного зарубного скребкового конвейера, адаптивного к сложным горно-геологическим и технологическим условиям функционирования; выполнении математического моделирования процессов транспортирования горной массы, профилирования почвы и подрубки пласта забойным зарубным скребковым конвейером.

Публикации по работе

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 8 печатных работах, в том числе в 2-х статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК); 1 статья – в журнале, входящем в международную базу данных и систему цитирования *Scopus*. Получен 1 патент на изобретение.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения общим объемом 148 страниц печатного текста, содержит 9 таблиц, 50 рисунков, список литературы из 115 наименований и одного приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы диссертации, представлены цель, идея, задачи и научная новизна исследования, практическая значимость, методология и методы исследования, соответствие паспорту специальности и положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о публикациях по работе.

В первой главе представлен анализ конструктивных особенностей, режимов работы и условий функционирования забойных скребковых конвейеров (ЗСК) очистных механизированных комплексов (ОМК) для добычи угля. Отмечено, что в основополагающих трудах в области горного машиностроения отсутствует системный анализ вопросов повышения адаптивности к изменяющимся по мере отработки выемочного столба горно-геологическим и технологическим условиям работы базового элемента очистного механизированного комплекса – ЗСК. Установлено, что одним из наиболее перспективных направлений повышения устойчивости и эффективности работы ОМК являются совершенствование структуры и расширение функциональных возможностей ЗСК в переменных условиях эксплуатации. Обоснована цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнен анализ объекта исследования – процесса функционирования ЗСК ОМК в изменяющихся, за время отработки выемочного столба, условиях. В соответствии с блок-схемой, на исследуемый процесс функционирования ЗСК влияют три группы факторов (рисунок 1).

Внешние факторы, неуправляемые, представлены совокупностью параметров, характеризующих горно-геологические и технологические условия работы ЗСК. Количественно данные параметры задаются диапазонами значений и могут быть описаны соответствующими статистическими характеристиками.

Внутренние факторы, ограниченно управляемые, представлены совокупностью параметров, характеризующих конструктивные и технические особенности ЗСК, его кинематическую связь с машинами ОМК, а также технологию работы в очистном забое.

Регулируемые параметры (управляемые факторы) характеризуют совокупность режимных параметров работы ЗСК, а также параметры его технического состояния.

Критерии и показатели эффективности функционирования ЗСК представляют собой группу выходных параметров, позволяющих оценивать исследуемый процесс количественно: значениями эксплуатационной производительности, удельных энергозатрат на транспортирование, коэффициентов готовности, использования и т.д.

Таким образом, процесс функционирования ЗСК по характеру

влияния на него внешних и внутренних факторов является комплексным, содержащим как детерминированные, так и вероятностные составляющие. Исследуемый процесс является многофакторным по количеству существенно влияющих на него внешних и внутренних факторов и наличию значительного объема исходных данных по горно-геологическим, техническим и технологическим условиям.

Известные методики анализа режимов работы ОМК учитывают, как правило, осредненные значения скорости подачи ($V_{пi}$) и суммарное время технологических перерывов ($T_{пi}$) в работе выемочной машины за контролируемый период времени. В то же время анализ записей регистраторов параметров работы ОМК в течение смены показывает нестабильность процесса очистной выемки: в широких пределах варьируется скорость подачи комбайна, добыча прерывается частыми кратковременными остановками, возникновение которых не связано с выполнением только штатных вспомогательных операций (рисунок 2).

Уменьшение текущей производительности ОМК ($Q_{фi}$) относительно расчетной ($Q_{рi}$) за контролируемый период t_i может быть оценено показателем устойчивости работы ОМК $П_{уi}$, равным отношению фактической производительности комбайна к расчетной производительности за анализируемый промежуток времени (1):

$$П_{уi} = Q_{фi} / Q_{рi} . \qquad (1)$$

Фактическая производительность ОМК определяется (2):

$$Q_{фi} = \frac{BH\gamma_к \sum t_{дi}}{(1/V_п) + \left(\sum t_{оi} / L_{дi}\right)} = \frac{K_л \sum t_{дi}}{(L_{дi} + V_п \sum t_{оi}) / V_п L_{дi}} = \frac{K_л V_п L_{дi} \sum t_{дi}}{L_{дi} + V_{пi} \sum t_{оi}}, \qquad (2)$$

где $\Sigma t_{оi}$ – суммарное время кратковременных остановок, мин; $\Sigma t_{дi}$ – суммарное время производительной работы, мин; B – ширина захвата исполнительного органа комбайна, м; H – мощность пласта, м; $\gamma_к$ – плотность угля в массиве, т/м^3; $V_п$ – средняя скорость подачи комбайна, м/мин; $L_{дi}$ – длина участка лавы, пройденная комбайном за контролируемый период времени, м; $K_л$ – величина постоянная для конкретных горнотехнических условий, $K_л = HB\gamma_к$; $\Sigma t_{оi} / L_{дi}$ – удельное время перерывов, мин/м.

Анализ выражения (2) показывает, что уменьшение времени остановок $\Sigma t_{оi}$ при увеличении времени производительной работы $\Sigma t_{дi}$ обеспечивает увеличение фактической производительности ($Q_{фi}$)

ОМК. Расчетная производительность ОМК определяется (3):

$$Q_{pi} = \frac{\sum t_{\text{р}i} BH\gamma_{\text{к}}}{(1/V_{\text{р}i}) + (\sum t_{\text{ор}i} / L_{\text{р}i})} = \frac{K_{л} V_{\text{р}i} L_{\text{р}i} \sum t_{\text{р}i}}{L_{\text{р}i} + V_{\text{р}i} \sum t_{\text{ор}i}}, \quad (3)$$

где $\Sigma t_{\text{р}i}$ – суммарное расчетное время производительной работы комплекса за контролируемый период времени, мин; $L_{\text{р}i}$ – расчетная длина участка лавы, пройденная комбайном за контролируемый период времени, м; $V_{\text{р}i}$ – расчетная скорость подачи комбайна, м/мин; $\Sigma t_{\text{ор}i}$ – суммарное расчетное время кратковременных остановок (без выключения электродвигателей), мин.

Значение времени $\Sigma t_{\text{ор}i}$ не может быть отнесено к регламентированным перерывам и не учитываются, то есть $\Sigma t_{\text{ор}i} = 0$.

Из зависимостей (1)–(3) следует, что показатель устойчивости процесса функционирования ОМК определяется (4):

$$\Pi_{\text{у}i} = \frac{\sum t_{\text{д}i} K_{\text{л}} V_{\text{п}} L_{\text{д}i} (L_{\text{р}i} + V_{\text{р}i} \sum t_{\text{ор}i})}{(L_{\text{д}i} + V_{\text{п}} \sum t_{\text{о}i})(\sum t_{\text{р}i} K_{\text{л}} V_{\text{р}i} L_{\text{р}i})} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{р}i}} \frac{\sum t_{\text{д}i}}{\sum t_{\text{р}i}} \frac{L_{\text{д}i}}{(L_{\text{д}i} + V_{\text{п}} \sum t_{\text{о}i})}. \quad (4)$$

Обозначим отношения $V_{\text{п}} / V_{\text{р}i} = K_{\text{у}v}$ коэффициентом устойчивости комбайна по скорости подачи, а отношение $\Sigma t_{\text{о}i} / \Sigma t_{\text{р}i} = K_{\text{у}t}$ коэффициентом устойчивости по времени. Заменим длину участка лавы $L_{\text{д}i}$ пройденной комбайном за контролируемый период времени произведением $V_{\text{п}} \Sigma t_{\text{д}i}$, представим выражение (4) в виде (5):

$$\Pi_{\text{у}i} = K_{\text{у}v} K_{\text{у}t} \frac{L_{\text{д}i}}{L_{\text{д}i} + V_{\text{п}} \sum t_{\text{о}i}} = K_{\text{у}v} K_{\text{у}t} \left(1 + V_{\text{п}} \frac{\sum t_{\text{о}i}}{L_{\text{д}i}}\right)^{-1} = K_{\text{у}v} K_{\text{у}t} \left(1 + \frac{\sum t_{\text{о}i}}{\sum t_{\text{д}i}}\right)^{-1}. \quad (5)$$

Показатель устойчивости работы адаптивного ОМК $\Pi_{\text{у}i}$ равен произведению дифференциальных коэффициентов устойчивости по скорости подачи $K_{\text{у}v}$ и времени $K_{\text{у}t}$ и на относительное увеличение времени остановок, и определяется выражениями (6) и (7):

$$K_{\text{уо}} = \left(1 + \left(\sum t_{\text{о}i} / \sum t_{\text{д}i}\right)\right)^{-1}; \quad (6)$$

$$\Pi_{\text{у}i} = K_{\text{у}v} K_{\text{у}t} K_{\text{уо}}. \quad (7)$$

Значения коэффициентов $K_{\text{у}v}$, $K_{\text{у}t}$ и $K_{\text{уо}}$ в реальных условиях функционирования ОМК зависят от следующих факторов:

1) степени взаимной адаптации оборудования и машин ОМК;

2) степени соответствия психофизиологических параметров оперативного персонала ритму работы оборудования ОМК;

3) адаптивности ОМК к переменным горно-геологическим и

технологическим условиям по мере отработки выемочного столба.

Применительно к ЗСК различают теоретическую ($Q_т$), техническую ($Q_{тех}$) и эксплуатационную ($Q_э$) производительности конвейера, рассчитываемые по формулам (8) и (9):

$$Q_{тех} = Q_т k_{тех} = Q_т k_г k_и, \quad (8)$$

где $k_{тех}$ – коэффициент технической реализации теоретической производительности; $k_г$ – коэффициент готовности ЗСК; $k_и$ – коэффициент использования ЗСК по производительности.

$$Q_э = Q_т k_э = Q_{тех}(k_э / k_{тех}) = Q_{тех} k_{э.тех} = Q_{тех} k'_г k_в, \quad (9)$$

где $k'_г$ – общий коэффициент готовности смежного оборудования ОМК; $k_э$ – коэффициент реализации теоретической производительности ЗСК в процессе эксплуатации; $k_в$ – коэффициент использования ЗСК во времени; $k_{э.тех}$ – коэффициент реализации технической производительности ЗСК в процессе эксплуатации.

Аналогично выражению (1) показатель устойчивости функционирования ЗСК ($П_{узск}$) может быть определен как отношение величины соответствующей эксплуатационной производительности конвейера $Q_э$ за анализируемый период времени к значению его теоретической производительности $Q_т$ (10):

$$П_{узск} = (Q_э / Q_т) = k_г k_и k'_г k_в. \quad (10)$$

Таким образом, величина показателя устойчивости функционирования ЗСК $П_{узск}$ зависит от коэффициентов готовности ЗСК ($k_г$) и смежного оборудования ОМК ($k'_г$), коэффициентов использования конвейера по производительности ($k_и$) и по времени ($k_в$). Величина показателя $П_{узск}$ характеризует адаптивность ЗСК к условиям функционирования. *Первое положение, выносимое на защиту, доказано.*

В третьей главе представлена последовательность формирования структурных формул ЗСК, отображающих функциональные элементы и их связи в конструкции конвейера. Обоснованы требования, к ЗСК, адаптивному к изменяющимся за время отработки выемочного столба горно-геологическим и технологическим условиям эксплуатации. Указывается, что конструкции адаптивных ЗСК должны разрабатываться с учётом возможности выполнения большего количества как основных, так и вспомогательных функций, для поддержания и обеспечения заданной интенсивности и устойчивой работы ОМК в изменяющихся условиях эксплуатации (рисунок 3).

Введено понятие зарубного забойного скребкового конвейера –

ЗЗСК, – это адаптивный к переменным условиям эксплуатации ЗСК, обеспечивающий профилирование почвы и подрубку пласта, интенсифицирующую процесс отжима угля при работе ОМК.

На основе анализа перспективных конструкций ЗСК предложена общая структурная формула (11) става ЗЗСК, адаптивного к изменяющимся, за время отработки выемочного столба, горно-геологическим и технологическим условиям:

$$\begin{cases} З\times С+Ц+Ц+Р\times Н|ГД|\overline{Р\times Н+Ц+Ц+С\times З}; \\ \overline{З\times С+Ц+Ц+Р\times Н}\,|\,ГД\,|\,Р\times Н+Ц+Ц+С\times З, \end{cases} \qquad (11)$$

где З – зачистной элемент; С – скребки; Ц – тяговая цепь; Р – рештак; Н – направляющая; ГД – гидродомкрат.

Обозначения видов связей, указывающих на способы сочетания функциональных элементов ЗЗСК, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Символы сочетания функциональных элементов ЗЗСК

Виды связи функциональных элементов ЗЗСК	Обозначения
Кинематическая связь (сочленения) элементов	+
Конструктивная связь (совмещение) элементов	×
Разделение функциональных элементов	|

Конструкция ЗЗСК, соответствующая структурной формуле (11), представлена на рисунке 4. ЗЗСК включает завальные рештачные секции *2*, опирающиеся на основания секции крепи *1*, и опорный лист *3*, который крепится к опорной стойке *4* завальной рештачной секции *2*. Опорный рычаг *6* забойной рештачной секции *8* крепится шарнирно к основанию опорной стойки *4* завальной рештачной секции *2*. Посредством опорной цапфы *7* и гидродомкрата *5* осуществляется регулирование положения забойной рештачной секции *8* по почве пласта. Перемещение скребков *9*, оснащенных резцами *13*, осуществляется по опорной направляющей *11* посредством тяговых цепей, закрепленных к скользящим кареткам *12*.

Предлагаемый ЗЗСК работает следующим образом. Скребок *9* с резцами *13* и тяговой цепью *10* выполняет функции транспортирования угольной массы, профилирования почвы пласта и подрубки пласта. Регулирование забойных рештачных секций *8* по почве пласта осуществляется посредством гидродомкратов *5*, которые поворачивают рештачные секции *8* относительно завальных секций *2*, что обусловливает заглубление резцов *13* в почву пласта. Транспортиро-

вание грузов и перемещение людей осуществляется по опорным листам *3*, размещенными над завальными рештачными секциями *2*. При переходе зон геологических нарушений и разрушении вмещающих пород листы *3* помещают над забойными рештачными секциями *8*. При этом разрушенная порода сгружается на завальные секции *2*, не смешивается с углём и транспортируется в противоположном направлении вдоль лавы. Уравновешивание скребков *9* забойной части конвейера обеспечивается размещением тяговых цепей *10* с двух сторон от линейной направляющей *11*, кинематически связанной со скользящими каретками *12* скребков *9*. Для повышения устойчивости ЗЗСК нижнее опорное основание *1* секции крепи может подходить больше или меньше под корпус секций *2* става ЗЗСК.

Использование предложенного адаптивного ЗЗСК, обеспечивающего подрубку и профилирование почвы пласта, раздельное транспортирование угля и породы при работе ОМК, позволяет регулировать интенсивность отжима пласта и повысить качество добываемого угля по гранулометрическому составу. В результате улучшается направленность перемещений ОМК и повышается устойчивость его функционирования в переменных по мере отработки выемочного столба условиях. *Таким образом, второе положение, выносимое на защиту, доказано.*

В четвертой главе приведены результаты моделирования процессов транспортирования угольной массы, профилирования почвы выработки и подрубки пласта ЗЗСК.

Таблица 2 – Конструктивные и режимные параметры ЗЗСК

Наименование параметра	Значение
Длина конвейера в поставке, м	200
Тяговый орган, тип	2 цент. цепи
Калибр цепей, м	0,026×0,092
Масса 1 м цепи заданного калибра, кг	15,5
Параметры скребка (ширина×высота×толщина), м	0,9×0,2×0,05
Расстояние между скребками, м	0,7…1,0
Скорость движения цепей, м/с	1…2
Скорость подачи конвейера на забой, м/с	0,01…0,04
Коэфф. сопротивления движению тягового органа	0,35
Крупность кусков транспортируемого угля, м	0,02…0,1
Коэфф. сопротивления движению угля по рештаку	0,6

Конструктивные и режимные параметры работы ЗЗСК принимались в соответствии с таблицей 2 и использовались при построении конечно-элементной модели участка ЗЗСК в программных пакетах *ANSYS Workbench* и *ROCKY DEM*.

Известно, что в зависимости от величины заполнения тягового органа ЗСК различают прерывистое и сплошное волочение угольной массы (рисунок 5). Режим сплошного волочения является наиболее экономичным, так как характеризуется максимальным использованием транспортных возможностей ЗЗСК. Величина заполнения тягового органа в этом случае определяется углом естественного откоса $\rho_д$ угольной массы, перемещаемой по рештаку.

Угол естественного откоса ρ перемещаемой угольной массы является одним из важнейших показателей при определении параметров работы ЗСК. Различают угол естественного откоса в покое ($\rho_п$) и в движении ($\rho_д$). Связь между ними определяется (12):

$$\rho_д = (0{,}3\ldots0{,}7)\ \rho_п. \qquad (12)$$

Согласно исследованиям И.В. Пономарева и М.А. Перепелкина, для угольной массы $\rho_п = 27\ldots45°$; $\rho_д = 10\ldots35°$. Угол естественного откоса для крупнокусковых фракций превышает углы мелкозернистых материалов. Кроме того, значение $\rho_д$ зависит от скорости движения груза по рештаку скребкового конвейера, т.к. попадая на поверхность ранее засыпанных материалов, куски дольше продолжают движение. Результаты компьютерного моделирования показывают, что при увеличении скорости движения тягового органа ЗЗСК от 1,0 до 2,0 м/с угол естественного откоса $\rho_д$ транспортируемой угольной массы уменьшается от 26 до 11 градусов (рисунок 6).

Производительность ЗЗСК, с учетом угла наклона почвы угольного пласта по падению α, определяется в соответствии с расчетной схемой (рисунок 7) по формулам (13) и (14):

$$\begin{cases} \alpha < \rho_д; \\ Q_{тех} = 3600\gamma v\left[(l_{ск} - b_з)(h_{ск} + \dfrac{\sin(\rho_д + \alpha)\sin(\rho_д - \alpha)}{2\sin 2\rho_д} t_{ск}) + b_з h_{ск}\right]; \end{cases} \qquad (13)$$

$$\begin{cases} \alpha \geq \rho_д; \\ Q_{тех} = 3600\gamma v l_{ск}(h_{ск} - \dfrac{\mathrm{tg}(\alpha - \rho_д)}{2} t_{ск}), \end{cases} \qquad (14)$$

где α – угол наклона пласта по падению, град.; $Q_{тех}$ – техническая

производительность ЗЗСК, т/ч; γ – насыпная плотность угольной массы, т/м^3; v – скорость перемещения тягового органа, м/с; $l_{ск}$ – длина скребка, м; $b_з$ – величина зарубки скребков ЗЗСК в пласт, $b_з$ = 0,2 м; $h_{ск}$ – высота скребка, м; $t_{ск}$ – шаг расстановки скребков, м.

Анализ результатов моделирования, выполненных при $t_{ск}$ = 0,7 м, показывает, что с увеличением угла наклона пласта α от 0 до 30° производительность ЗЗСК снижается, причём тем интенсивнее, чем выше скорость перемещения тягового органа (рисунок 8).

Исходя из зависимостей (8)–(10), коэффициент использования ЗЗСК по производительности $k_и$ при увеличении угла наклона пласта может быть представлен выражением (15):

$$k_и = Q_{техα0} / Q_{техαi}, \qquad (15)$$

где $Q_{техα0}$ – техническая производительность ЗЗСК при угле наклона пласта по падению α = 0 град., т/ч; $Q_{техα0}$ – техническая производительность ЗЗСК при угле наклона почвы угольного пласта по падению α = i град., т/ч.

Результаты расчетов изменения коэффициента производительности ЗЗСК в зависимости от угла наклона почвы отрабатываемого угольного пласта по падению и скорости движения тягового органа приведены на рисунке 9. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением скорости движения тягового органа ЗЗСК в диапазоне от 1 до 2 м/с угол естественного откоса угольной массы, перемещаемой в пространстве между скребками, уменьшается по установленной зависимости, что определяет снижение коэффициента использования конвейера по производительности при отработке наклонных угольных пластов. Данное негативное явление усугубляется с увеличением шага расстановки скребков. *Таким образом, третье положение, выносимое на защиту, доказано.*

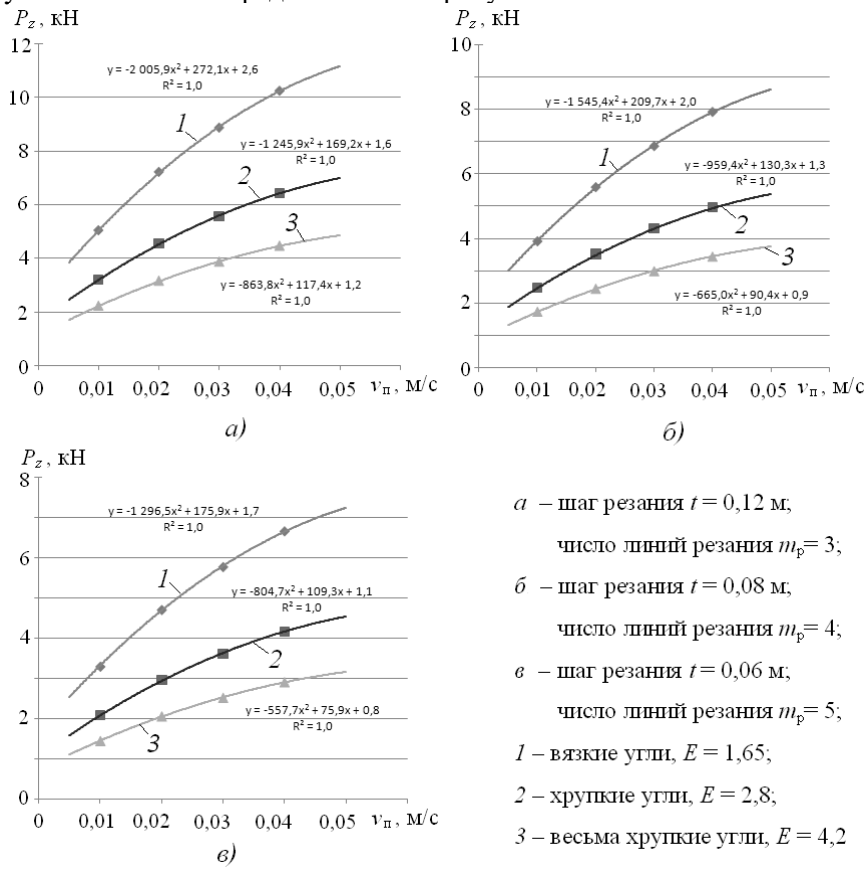
Расчет параметров процесса профилирования почвы лавы и подрубки пласта резцами ЗЗСК выполнялся с использованием известных зависимостей экспериментально-статистической теории резания углей и горных пород. Значение средней силы резания на остром неповоротном резце ЗЗСК рассчитывается по формуле (16):

$$P_z = 10 A_р h t k_{от} k_ф k_з k_y k_b k_θ, \qquad (16)$$

где P_z – средняя сила резания на одиночном неповоротном резце, установленном на скребке ЗЗСК, кН; $k_ф$, $k_з$, k_y, k_b, $k_θ$ – коэффициенты, характеризующие влияние формы передней поверхности резца, об-

нажения забоя, кинематического угла резания, ширины режущей кромки и угла установки резца на среднюю силу резания.

Графики изменения силы резания на одиночном резце, установленном на скребке ЗЗСК, в зависимости от параметров схемы резания, скорости подачи конвейера на забой и степени хрупкости угольного пласта представлены на рисунке 10.



а – шаг резания $t = 0{,}12$ м;
число линий резания $m_р = 3$;
б – шаг резания $t = 0{,}08$ м;
число линий резания $m_р = 4$;
в – шаг резания $t = 0{,}06$ м;
число линий резания $m_р = 5$;
1 – вязкие угли, $E = 1{,}65$;
2 – хрупкие угли, $E = 2{,}8$;
3 – весьма хрупкие угли, $E = 4{,}2$

Рисунок 10 – Изменение силы резания P_z на одиночном резце ЗЗСК в зависимости от скорости подачи конвейера на забой $v_п$

Анализ полученных результатов показывает, что меньшие средние значения силы резания на резцах ЗЗСК обеспечиваются при разрушении хрупких и весьма хрупких углей (рисунок 10, поз. *2* и *3*)

при значениях шага резания t < 0,08 м. Высокая трещиноватость, характерная для пластов хрупких углей, будет способствовать интенсификации процесса отжима при использовании ЗЗСК, что снизит удельные энергозатраты процесса разрушения угольных пластов, повысит устойчивость и эффективность работы ОМК.

Полученные результаты позволили обосновать рациональные параметры ЗЗСК: шаг установки скребков $t_{ск}$ = 0,7…0,8 м; скорость перемещения тягового органа v = 1,4…1,5 м/с; скорость подачи ЗЗСК на забой $v_п \leq 0,02$ м/с; количество линий резания $m_р$ = 4…5 шт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи обоснования схемных и конструктивных решений адаптивного забойного зарубного скребкового конвейера с целью повышения устойчивости работы очистного механизированного комплекса для добычи угля в изменяющихся по мере отработки выемочного столба горно-геологических и технологических условиях.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Определен диапазон изменений горно-геологических условий комплексно-механизированных очистных забоях по мере отработки выемочных столбов, влияющих на эффективность функционирования забойных скребковых конвейеров, как базовых элементов очистных механизированных комплексов.

2. Установлено влияние структуры и конструкции забойных скребковых конвейеров на эффективность функционирования очистных механизированных комплексов при работе в изменяющихся по мере отработки выемочных столбов горно-геологических и технологических условиях.

3. Обоснованы требования к забойному скребковому конвейеру, как элементу адаптивного очистного механизированного комплекса. Обоснованы комплексные показатели устойчивости функционирования адаптивного очистного механизированного комплекса и его базового элемента – забойного скребкового конвейера.

4. Обоснованы схемные и конструктивные решения забойного зарубного скребкового конвейера очистного механизированного комплекса адаптивного к изменяющимся изменяющихся по мере

отработки выемочного столба горно-геологическим и технологическим условиям функционирования. Предложена и запатентована конструкция забойного зарубного скребкового конвейера, обеспечивающего профилирование почвы пласта как опорной и направляющей поверхности для движения очистного механизированного комплекса, а также раздельное транспортирование угля и породы.

5. Выполнено математическое и компьютерное моделирование процессов транспортирования горной массы и подрубки пласта забойным зарубным скребковым конвейером очистного механизированного комплекса.

6. Обоснованы рациональные параметры забойного зарубного конвейера очистного механизированного комплекса адаптивного к изменяющимся по мере отработки выемочного столба горно-геологическим и технологическим условиям.

7. Перспективы развития темы диссертации включают разработку физических моделей и опытных образцов забойных зарубных скребковых конвейеров очистных механизированных комплексов и проведение лабораторных и шахтных экспериментальных исследований по определению параметров работы и оценке эффективности их функционирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. **Королев, А. И.** Повышение адаптивности очистного механизированного комплекса к изменяющимся горно-геологическим условиям модернизацией его забойного конвейера / А. И. Королев / Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 9. – С. 214-219.

2. Стебнев, А. В. Анализ и оценка устойчивости режимов работы очистного механизированного комплекса / А. В. Стебнев, В. В. Габов, **А. И. Королев** // Горное оборудование и электромеханика. – 2018. – № 1. – С. 37-40.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Babyr, N. V. Enhancement of powered cleaning equipment with the view of mining and geological conditions / N. V. Babyr, **A. I. Korolev**, T. V. Neupokoeva // IOP: Earth and Environmental Science 194 (EES). – 2018.

Публикации в прочих изданиях:

4. **Королев, А. И.** Забойный скребковый конвейер очистного механизированного комплекса адаптивного к изменяющимся горно-геологическим условиям / А. И. Королев, В. В. Габов // Инновации на транспорте и в машиностроении. Сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Отв. ред. В.В. Габов, Н.С. Голиков. – 2016. – С. 27-30.

5. Габов, В. В. Адаптация очистного комплекса при отработке выемочного столба к изменяющимся горно-геологическим условиям внедрением забойного зарубного конвейера / В. В. Габов, **А. И. Королев** // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017. Сборник научных трудов международной научно-технической конференции. Научные редакторы В. В. Максаров, В. В. Габов. – 2017. – С. 32-34.

6. Габов, В. В. Забойный конвейер очистного механизированного комплекса адаптивного к изменяющимся горно-геологическим условиям / В. В. Габов, **А. И. Королев** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека» в рамках Уральской горнопромышленной декады. Отв. редактор Ю. А. Лагунова. – 2016. – С. 68-71.

7. Габов, В. В. Забойный конвейер очистного комплекса адаптивного к изменяющимся горно-геологическим условиям при отработке выемочного столба / В. В. Габов, **А. И. Королев** // Сборник трудов 6-й Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Опыт прошлого – взгляд в будущее» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», «ИГД». Тула. – 2016. – С. 34-37.

8. **Королев, А. И.** Актуальность применения зарубного конвейера в составе очистного механизированного комплекса / А. И. Королев // Сборник трудов Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики». ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». – 2017. – С. 316-321.

Патенты:

9. Патент RU 2574090 C1 МПК E21F 13/00, B 65 G 19/28, B 65 G 19/26. Забойный скребковый зарубной конвейер / В. В. Габов, **А. И. Королев**, Д. А. Задков. – № 2014149673/03; Заявлено 09.12.2014; Опубл. 10.02.2016, Бюл. № 10. – 8 с.

Рисунок 1 – Блок-схема процесса функционирования ЗСК

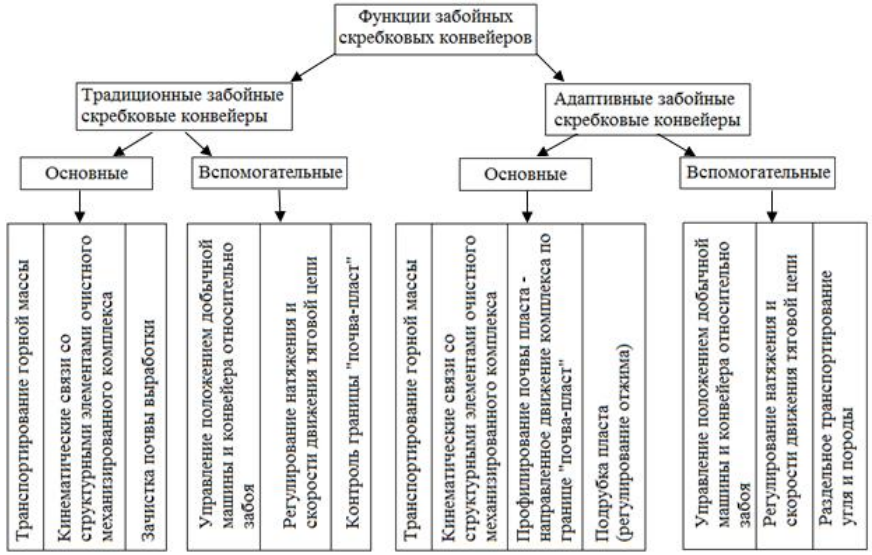


Рисунок 3 – Функциональные особенности традиционных и адаптивных ЗСК

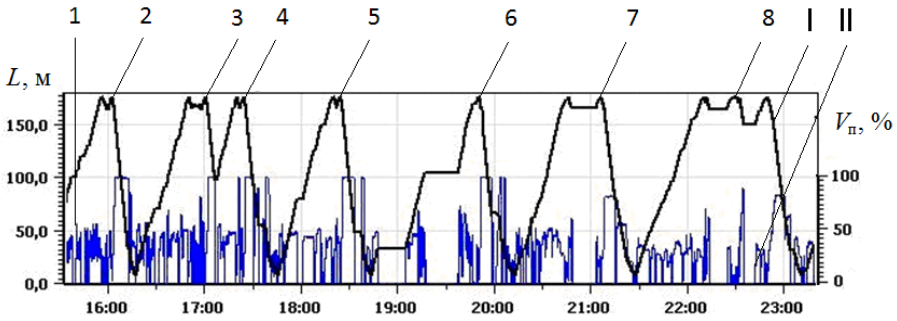


Рисунок 2 – Скорость движения комбайна и его положение по длине лавы в течение смены: *I* – положение комбайна; *II* – скорость подачи комбайна *V*п в % от максимальной (*V*пmax = 27,5 м/мин).; *1* – скорость движения; *2…8* – изменение положения комбайна в лаве; *L* – длина лавы, м

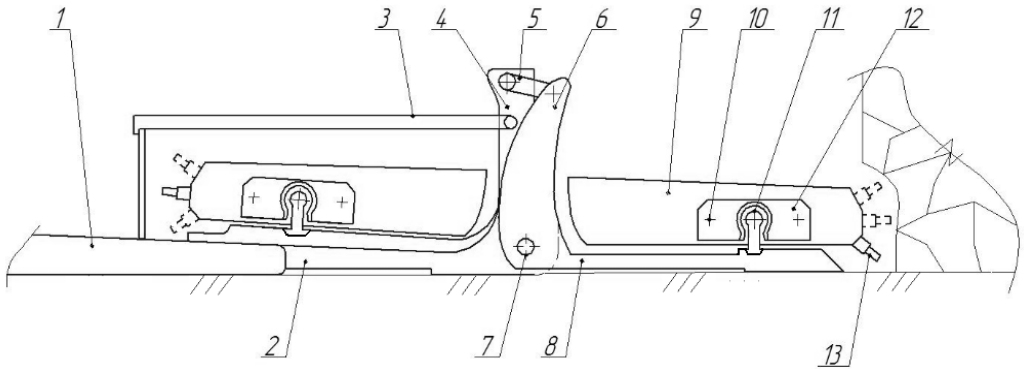


Рисунок 4 – ЗЗСК, адаптивный к изменяющимся условиям функционирования

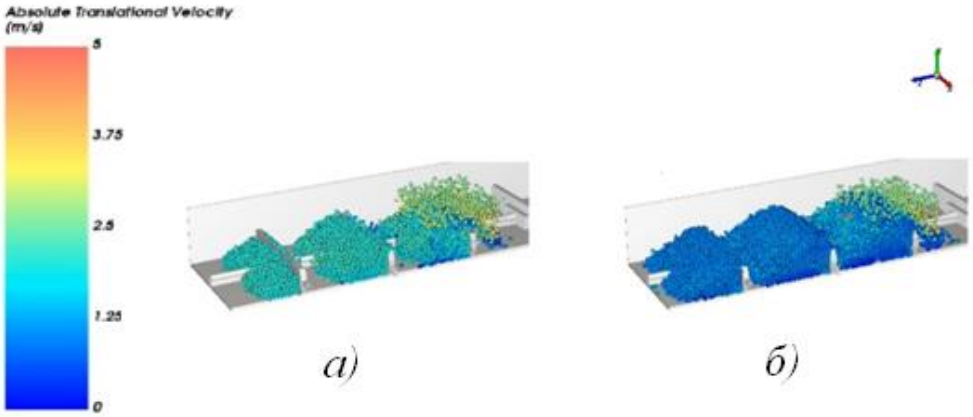


Рисунок 5 – Заполнение рештака конвейера угольной массой при прерывистом (*а*) и сплошном (*б*) волочении

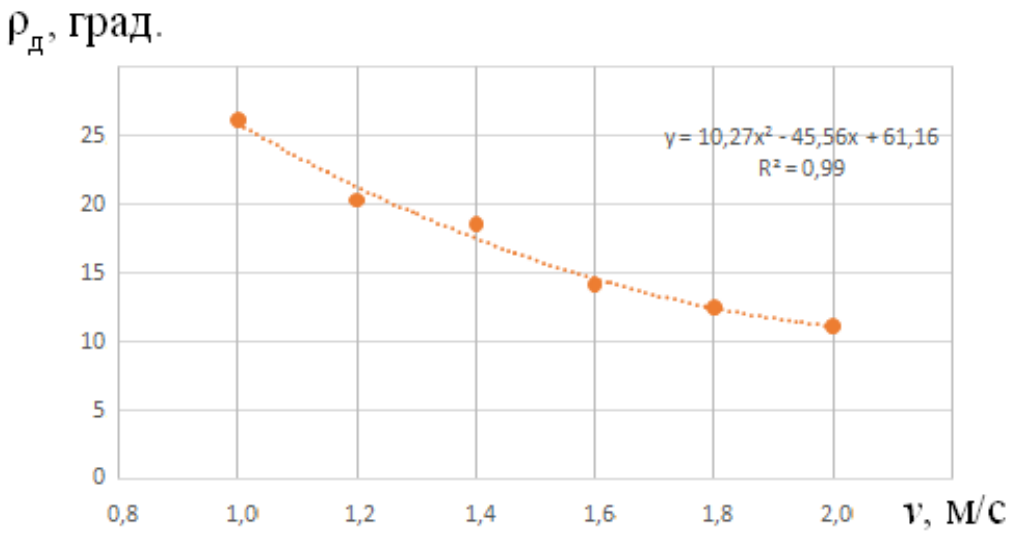


Рисунок 6 – Изменение угла естественного откоса транспортируемой угольной массы в зависимости от скорости движения тягового органа ЗЗСК, м

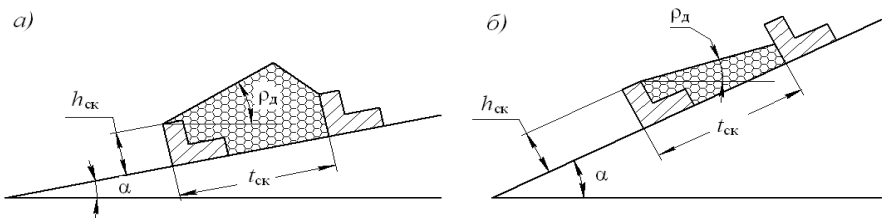


Рисунок 7 – Расчетная схема ЗЗСК: *а)* $\alpha < \rho_д$; *б)* $\alpha \geq \rho_д$

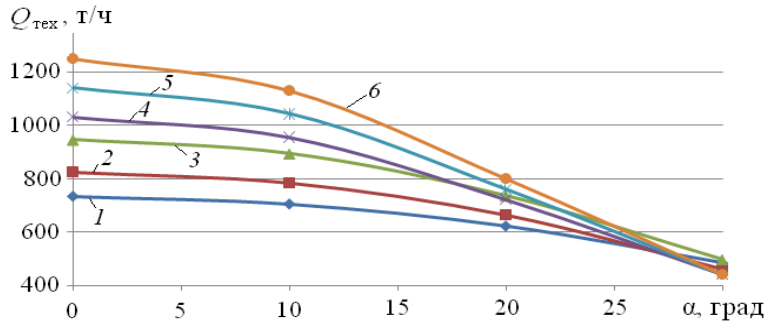


Рисунок 8 – Изменение производительности ЗЗСК в зависимости от угла наклона почвы угольного пласта при скорости перемещения тягового органа: *1* – *v* =1 м/с; *2* – *v* =1,2 м/с; *3* – *v* =1,4 м/с; *4* – *v* =1,6 м/с; *5* – *v* = 1,8 м/с; *6* – *v* =2,0 м/с

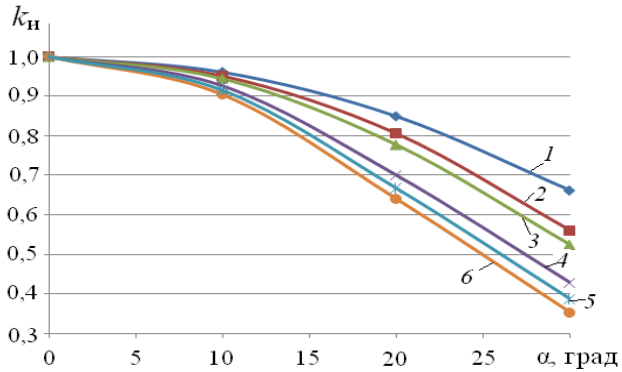


Рисунок 9 – Изменение коэффициента использования ЗЗСК по производительности в зависимости от угла наклона почвы угольного пласта по простиранию при скорости перемещения тягового органа: *1* – *v* =1 м/с;
2 – *v* =1,2 м/с; *3* – *v* =1,4 м/с; *4* – *v* =1,6 м/с; *5* – *v* = 1,8 м/с; *6* – *v* =2,0 м/с