

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Зинченко Павел Петрович

УДК 622.232.72.

**ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ ОЧИСТНЫХ
КОМБАЙНОВ НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ДЛЯ ВЫЕМКИ
ТОНКИХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2021 г.

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ШАБАЕВ Олег Евгеньевич

Официальные
оппоненты:

Ведущая
организация:

Защита состоится «___» _____ 20__ года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, I учебный корпус, аудитория 203.

Тел. факс: +380 (62) 304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, II учебный корпус, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01
д-р техн. наук, доц.

И. А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Угольная промышленность является основной сырьевой и энергетической базой для всех отраслей народного хозяйства Донецкого региона, а каменный уголь - единственным стратегическим энергоносителем, имеющим большие запасы. Как показывает вероятностный сценарий мирового потребления первичной энергии по видам топлива в период с 2015 г. по 2040 г. уголь продолжит входить в тройку лидеров среди мировых энергоносителей, тем самым сохранится актуальность его добычи.

По данным ДонУГИ, запасы каменного угля Донбасса составляют 6,84 млрд. тонн, из которых порядка 83,2 % сосредоточено в пологих пластах мощностью 0,55...1,20 м. Из разведанных 1092 пологих шахтопластов, 965 наиболее приспособленные к комбайновой выемке, остальные 127 - могут выниматься с использованием струговых установок.

Для добычи угля на шахтах Донбасса применяются современные узкозахватные очистные комбайны (ОК) со шнеками, УКД400, УКД200-500 и с вертикальными барабанами КА200, КБТ, входящие в состав механизированных комплексов. Наибольшее распространение среди исполнительных органов (ИО) ОК для тонких пластов нашли шнековые органы. Это связано с простотой конструкции ИО, относительной простотой регулирования по мощности пласта и рядом других преимуществ. Однако недостаточная погрузочная способность шнеков малых диаметров ограничивает рабочую скорость перемещения ОК, и как следствие снижает производительность комплекса и увеличивает энергоемкость процессов разрушения и погрузки горной массы. Поэтому, одним из основных направлений в повышении технического уровня ОК для тонких пологих пластов является повышение погрузочной способности шнековых ИО, что требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Степень разработанности темы исследования. В основу первых представлений о функционировании шнековых ИО как погрузочных устройств была положена теория винтовых конвейеров. Однако проведенный на кафедре «Горные машины» ДПИ ряд стендовых экспериментальных исследований процесса погрузки горной массы шнеками малых диаметров показал, что значения погрузочной способности ИО, полученные экспериментально и с использованием модели винтового конвейера, отличаются между собой в 2-4 раза. Причиной столь значительной разницы является отличие физической картины процесса погрузки разрушенной горной массы шнеками малых диаметров от физической картины функционирования винтового конвейера.

На основе комплекса проведенных стендовых экспериментальных исследований учеными кафедры «Горные машины» ДПИ была разработана теория погрузки, учитывающая характер заполнения шнека малого диаметра, формирование окна выгрузки и объемное напряженное состояние горной массы. На основании разработанной теории развиты и созданы новые методы расчета и выбора параметров шнековых ИО малого диаметра. Вместе с тем не установлены закономерности комплексного влияния конструктивных, режимных пара-

метров и структуры подсистемы погрузки ОК со шнековым ИО малого диаметра на эффективность его работы в конкретных условиях эксплуатации.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами в условиях тонких пологих пластов, на основе оптимизации структуры, конструктивных и режимных параметров с учетом установленных закономерностей их влияния на производительность и энергоемкость.

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

1. Установить влияние ширины захвата шнекового исполнительного органа малого диаметра на энергоемкость процесса погрузки разрушенной горной массы в представительных условиях эксплуатации очистных комбайнов;
2. Разработать комплексную математическую модель рабочих процессов разрушения и погрузки, учитывающую особенности процесса погрузки разрушенной горной массы шнеком малого диаметра;
3. Исследовать влияние конструктивных, режимных параметров и структуры очистных комбайнов на производительность и энергоемкость работы;
4. Разработать методику и математическую модель оптимизации структуры, конструктивных и режимных параметров очистных комбайнов по критерию максимальной производительности при минимальной энергоемкости работы.

Объект исследований – процесс разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами малых диаметров.

Предмет исследования – закономерности влияния геометрических и режимных параметров и структуры очистного комбайна на процесс погрузки.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые предложен метод определения в реальных условиях эксплуатации энергоемкости процессов разрушения и погрузки очистными комбайнами нового технического уровня с индивидуальной подсистемой привода исполнительных органов для тонких пологих пластов на основе фиксации токов электродвигателей приводов резания.

2. Впервые установлены регрессионные зависимости мощности $P_{\text{пог}}$ и удельных энергозатрат $W_{\text{пог}}$ погрузки от ширины захвата B_3 и скорости подачи комбайна $V_{\text{п}}$ экспоненциального вида: $P_{\text{пог}}(V_{\text{п}}, B_3) = k_1 \cdot B_3 \cdot e^{k_2 \cdot B_3 \cdot V_{\text{п}}}$, $W_{\text{пог}}(V_{\text{п}}, B_3) = k_3 \cdot V_{\text{п}}^{-1} \cdot e^{k_2 \cdot B_3 \cdot V_{\text{п}}}$.

3. Разработана комплексная математическая модель рабочих процессов разрушения и погрузки горной массы шнеками малых диаметров, отличающаяся учетом формирования потоков погруженной и переброшенной выгружающей лопастью опережающего исполнительного органа, циркулирующей в рабочем объеме шнека и остатка горной массы на почве пласта.

4. Впервые предложена зависимость для определения технической производительности очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологих пластов, учитывающая затраты времени на вспомогательные технологические операции, обусловленные заштыбовкой шнека малого диаметра.

5. Разработаны метод и математическая модель оптимизации параметров и структуры очистного комбайна под заданные горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации по критерию максимальной технической производительности при приемлемой энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы, **отличающаяся** учетом комплексного влияния геометрических (диаметра шнека, ширины захвата, диаметр рукояти качалки в зоне окна выгрузки), режимных (скорость перемещения комбайна и частота вращения шнека), а также структурных (наличие дополнительных погрузочных устройств в виде погрузочных щитков) параметров на рабочие процессы разрушения и погрузки горной массы шнеками. Оптимизация геометрических и режимных параметров и структуры очистного комбайна приведет к повышению технической производительности в 1,1...2,1 раза, и снижению мощности и удельных энергозатрат разрушения и погрузки в 1,3...1,5 и 1,3...2,3 раза соответственно.

Теоретическая значимость работы заключается в дальнейшем развитии методов повышения производительности и снижения энергоемкости работы очистных комбайнов на основе выбора рациональных значений конструктивных, режимных параметров и структуры подсистемы погрузки очистного комбайна со шнековым исполнительным органом малого диаметра с учетом установленных закономерностей их влияния на процесс погрузки горной массы.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

– методики обработки результатов экспериментальных исследований работы современных очистных комбайнов с индивидуальной подсистемой привода каждого исполнительного органа, позволяющей на основе фиксации действующих токов электродвигателей приводов резания определять основные параметры разрушения и погрузки горной массы шнековыми исполнительными органами малых диаметров;

– программного обеспечения для имитационного моделирования процессов разрушения и погрузки горной массы шнековым исполнительным органом очистного комбайна в условиях тонких пологих пластов с учетом процесса циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека;

– номограммы выбора рациональных параметров исполнительных органов, обеспечивающих минимальную энергоемкость процессов разрушения и погрузки при заданной технической производительности, а также наибольшую техническую производительность очистного комбайна в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях;

– методики обоснования рациональных геометрических и режимных параметров и структуры очистных комбайнов для тонких пологих пластов по критерию максимальной технической производительности при приемлемой энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы с учетом ограничений, связанных с горно-геологическими и горнотехническими условиями эксплуатации.

Результаты диссертационной работы: приняты ГУ «ДОНУГЛЕМАШ» в качестве научно-методической основы для совершенствования и создания очистных комбайнов для тонких пологих пластов; внедрены в учебный процесс

кафедры «Горные машины» ГОУВПО «ДОННТУ» при подготовке специалистов, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело» (специализация «Горные машины и оборудование»).

Методология и методы исследования. Достижение поставленной цели обеспечивалось на основе системного подхода и рационального сочетания теоретических и экспериментальных методов исследований. При разработке математической модели (ММ) процесса разрушения и погрузки разрушенной горной массы использовались методы теории резания угля резцовым режущим инструментом, теории погрузки разрушенной горной массы шнеками малых диаметров и механики сыпучей среды. Экспериментальные исследования по установлению закономерности влияния ширины захвата шнека на энергоёмкость процесса погрузки реализованы на основе методов планирования эксперимента в представительных условиях эксплуатации очистных комбайнов с использованием современных методов и средств электрических измерений. Теоретические исследования выполнены методами имитационного моделирования.

Положения, выносимые на защиту.

1. Впервые теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что мощность и удельные энергозатраты на погрузку шнеками малых диаметров возрастают с увеличением ширины захвата тем интенсивнее, чем выше скорость перемещения очистного комбайна. Это обусловлено процессом циркуляции, и как следствие экспоненциальным ростом напряженного состояния горной массы в рабочем пространстве исполнительного органа, при этом, чем больше ширина захвата, тем процесс циркуляции интенсивнее и наступает при меньших значениях скорости перемещения очистного комбайна.

2. Впервые теоретически установлено, что при работе очистных комбайнов со шнеками малых диаметров можно выделить три характерных диапазона скоростей перемещения, отличающихся закономерностями процесса погрузки (1-й характеризуется свободной погрузкой; 2-й – перебросом непогруженной горной массы на нерабочую сторону шнека в виду ограниченной площади окна выгрузки; 3-й – циркуляцией горной массы, обусловленной ограниченной пропускной способностью зазоров дополнительного погрузочного устройства) и долей мощности процесса погрузки от процесса разрушения (в 1-м и 2-м диапазонах - 9...44 %, в 3-м - 27...82 % в зависимости от свойств разрушаемого массива). Оснащение очистных комбайнов зачистным лемехом или полноразмерным погрузочным щитком приводит к снижению остатка горной массы на почве пласта в 1,2...5,9 раза при интенсификации процесса циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека, что обуславливает отсутствие 2-го диапазона с уменьшением значения граничной скорости перемещения комбайна по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека в 1,1...1,3 раза.

3. Впервые теоретически установлено, что максимальная техническая производительность при приемлемой энергоёмкости достигается при работе комбайна с граничной скоростью перемещения по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека диаметром близким к средней мощности пласта с наименьшей из принятого диапазона шириной захвата.

При наличии ограничений, обусловленных конкретными горно-геологическими и горнотехническими условиями эксплуатации, рациональные значения диаметра и ширины захвата шнека необходимо устанавливать на основе разработанных математической модели оптимизации структуры и параметров очистного комбайна и комплексной имитационной модели рабочих процессов разрушения и погрузки горной массы шнековыми исполнительными органами малых диаметров. Рациональное сочетание значений диаметра и ширины захвата шнека позволит повысить техническую производительность в 1,1...2,1 раза и снизить мощность и удельные энергозатраты разрушения и погрузки в 1,3...1,5 и 1,3...2,3 раза соответственно.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью поставленных задач и принятых допущений, достаточным объемом аналитических исследований, согласованностью результатов теоретических и экспериментальных исследований. Расчетные значения мощности на погрузку горной массы шнековыми исполнительными органами, выгруженной, переброшенной и циркулирующей горной массы в рабочем пространстве шнека отличаются от экспериментальных значений не более чем на 20 %.

Основные положения диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе: 8 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, а также 6 публикаций материалов и тезисов на международных и всероссийских форумах и конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 163 страницы машинописного текста и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 103 источников на 11 страницах и 2 приложений на 26 страницах. Основной текст, изложенный на 136 страницах, иллюстрируется 36 рисунками и содержит 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первом разделе «Состояние проблемы, цель и задачи исследований» выполнен анализ современного состояния проблемы повышения технического уровня ОК со шнековыми ИО для тонких пологих пластов.

Вопросом создания и исследования работы ОК со шнековыми ИО занимались многие научно-исследовательские и проектно-конструкторские институты, ряд высших учебных заведений и заводов горного машиностроения. Значительный вклад в решение этих вопросов внесен учеными: А. В. Алейником, Н. Г. Бойко, А. В. Докукиным, Е. З. Позиным, В. Н. Потураевым, В. Г. Нечепавым, В. И. Кутовым, Я. М. Хором, В. Н. Хориним и другими.

Одним из основных направлений в повышении технического уровня ОК для тонких пологих пластов является повышение погрузочной способности шнековых ИО.

Наиболее корректной на сегодняшний день является теория погрузки, разработанная учеными: профессорами, д.т.н. Н. Г. Бойко, В. Г. Нечепаемым; доцентами, к.т.н. А. В. Болтяном, В. И. Тарасевичем, В. Г. Шевцовым, учитывающая основные аспекты, оказывающие влияние на физическую картину процесса погрузки горной массы шнековыми ИО малых диаметров. В рамках этой теории в наиболее общем виде рассмотрено влияние процесса циркуляции, на производительность погрузки. Установлена закономерность влияния ширины захвата и угла поворота шнека на напряженное состояние выгружаемой горной массы. На основании разработанной теории развиты и созданы новые методы расчета и выбора параметров шнековых ИО для ОК, работающих в условиях тонких пологих пластов.

Вместе с тем, следует отметить, что в настоящее время не в полной мере изучены вопросы комплексного влияния структуры, конструктивных и режимных параметров ОК на эффективность их работы в заданных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации, что говорит об актуальности дальнейших исследований в этом направлении.

Во втором разделе «Экспериментальные исследования влияния ширины захвата шнека малого диаметра на энергоемкость процесса погрузки» приведены планирование, результаты и методика обработки шахтных исследований, закономерности формирования энергоемкости процесса погрузки.

В качестве объектов исследований выбраны ОК нового технического уровня, эксплуатируемые в представительных условиях: УКД400 - шахта «Красный партизан», 77 западная лава пласта k_5' «Должанский», УКД200-500 шахта «Терновская» 524-й лавы пласта C_5^B . ИО исследуемых ОК УКД400 и УКД200-500 отличались шириной захвата 0,7 м и 0,8 м соответственно. В ходе проведения шахтных экспериментов осуществлялась фиксация действующих фазных токов электродвигателей приводов опережающего и отстающего ИО, а также значений скорости перемещения ОК.

Разработана методика обработки данных шахтных экспериментов, позволяющая определять значения мощности и удельных энергозатрат разрушения и погрузки горной массы современными ОК с индивидуальной подсистемой привода каждого ИО, работающих в условиях тонких пологих пластов, на основе значений действующих в процессе выемки угля токов электродвигателей приводов шнековых ИО. Разработанная методика может быть использована для расшифровки данных бортовых компьютеров, которыми оснащаются современные ОК.

На основе разработанной методики и регрессионного анализа получены зависимости для определения мощности $P_{\text{пог}}$ и удельных энергозатрат $W_{\text{пог}}$ рабочего процесса погрузки отделенной горной массы как функции ширины захвата шнека B_3 и скорости перемещения комбайна $V_{\text{п}}$.

Анализ приведенных на рисунке 1 зависимостей показывает, что мощность и удельные энергозатраты процесса погрузки с увеличением ширины за-

хвата ИО экспоненциально возрастают с увеличением скорости перемещения комбайна. Так, при работе ОК со скоростью перемещения $V_{\Pi} = 4$ м/мин увеличение ширины захвата ИО с 0,7 до 0,8 м приводит к росту мощности в 1,5 раза и удельных энергозатрат погрузки в 1,3 раза. Дальнейшее увеличение скорости перемещения до $V_{\Pi} = 6$ м/мин приводит к значительному росту мощности в 1,7 раза и удельных энергозатрат погрузки в 1,5 раза соответственно. Этот рост обусловлен процессом циркуляции разрушенной горной массы в рабочем пространстве ИО, при этом, чем больше ширина захвата шнека, тем раньше он наступает и тем интенсивнее протекает.

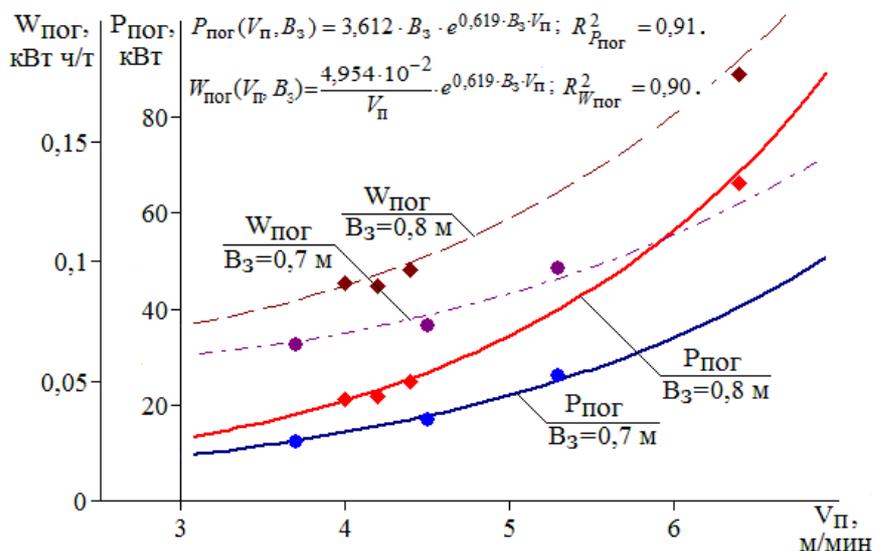


Рисунок 1. Энергоемкость рабочего процесса погрузки с учетом B_3 как функция V_{Π}

Третий раздел «Математическая модель рабочих процессов очистных комбайнов» посвящен формализации рабочих процессов разрушения и погрузки отделенной горной массы с учетом особенностей процесса погрузки отделенной горной массы шнеком малого диаметра.

Для установления закономерностей влияния конструктивных, режимных параметров и структуры ОК на показатели эффективности его работы, разработана комплексная ММ процессов разрушения и погрузки горной массы, учитывающая особенности рабочего процесса погрузки шнеком малого диаметра. Отличие разработанной модели от ранее созданных заключается в учете формирования потоков погруженной и переброшенной выгружающей лопастью, циркулирующей в рабочем объеме опережающего ИО и остатка горной массы на почве пласта.

Для программной реализации разработанной комплексной ММ рабочих процессов разрушения и погрузки горной массы ОК со шнеками малых диаметров была разработана структурная схема, представленная на рисунке 2.

На рисунке 2 приведены следующие обозначения: $\bar{P}_{\text{пл}}()$, $\bar{P}_{\text{рез}}()$, $\bar{P}_{\text{сх.н.}}()$, $\bar{P}_{\text{ио}}()$, $\bar{P}_{\text{кор}}()$, $\bar{P}_{\text{реж}}()$, $\bar{P}_{\text{кон.}}()$, $\bar{P}_{\text{д.п.у.}}$ – вектор параметров разрушаемого угольного пласта, режущего инструмента и схемы его набора, шнека, корпуса ОК, режима работы ОК, скребкового конвейера и дополнительных погрузочных устройств соответственно; входные параметры ($\bar{H}_{\text{пл}}$, \bar{A}_p , E , ρ , γ , $f_{y.u.}$, $f_{y.ст.}$) – соответственно средняя мощность пласта, средняя сопротивляемость угля резанию в не отжатом массиве и степень его хрупкости, плот-

ность угля в массиве и в разрушенном состоянии, коэффициенты трения выгружаемого угля об уголь и металлические поверхности; $(l_{рез}, d_{рез}, \alpha_{рез}, \delta_{рез})$ – конструктивный вылет, ширина режущей части резца, конструктивный задний угол и угол резания резца соответственно; $(\gamma_{рез}, t_{рез}, \beta_{рез})$ – угол и шаг установки резца, угол наклона резца относительно вектора скорости резания; $(D_{ио}, d_{ст}, \alpha_{л}^{ст}, N_{зах}, \delta_{л}, B_{д})$ – соответственно диаметр ИО по резцам и его ступице, угол наклона лопасти их количество и толщина, ширина отрезного диска; $(d_{к}, h_{кор}, l_{кор})$ – диаметр редуктора резания в зоне разгрузочного торца шнека, высота и длина вынесенного в уступ забоя корпуса ОК; $(n_{об})$ – частота вращения ИО; $(H_{к}, l_{тр})$ – высота рештака и расстояние от разгрузочного торца ИО до рештака конвейера; $V_{у.об}, V_{в.об}, V_{п.об}, V_{ц.об}, V_{о.об}$ – объем горной массы за оборот ИО разрушенной, погруженной через окно выгрузки, переброшенной выгружающей лопастью, циркулирующей в рабочем объеме шнека V_p и оставшейся на почве соответственно; $V_{т}, V_{в}, V_{пер}, V_{ост}, V_{цир}$ – соответственно производительность разрушения, погрузки, переброса, остатка на почве пласта и циркуляции; $P_{рез}^{опер}, P_{рез}^{отст}, P_{ио}, P_{ок}$ – мощность на разрушение опережающим, отстающим ИО, разрушение и погрузку шнеком и комбайном соответственно; $W_{ок}$ – удельные энергозатраты ОК; h – толщина стружки; $S_{ок}, S_{вал}$ – площади окна выгрузки, и перекрытой «валком» непогруженной горной массы; F_z – усилие резания.

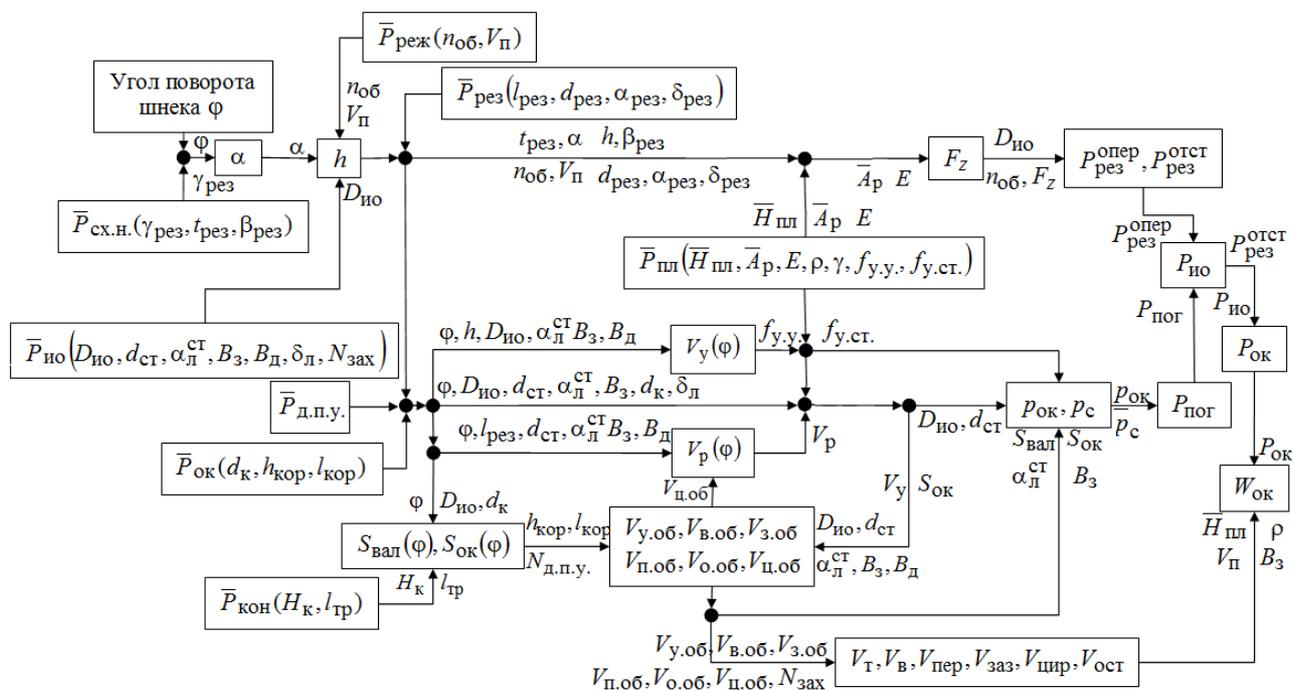


Рисунок 2. Структурная схема комплексной ММ процессов разрушения и погрузки разрушенной горной массы ОК

Для учета влияния циркулирующей горной массы в рабочем объеме шнека на рабочий процесс погрузки в рамках комплексной ММ, была разработана ММ формирования потоков погруженной и переброшенной, циркулирующей и остатка горной массы на почве пласта:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{в.об} = \begin{cases} V_{у.об} - V_{р.об} & \text{при } V_{у.об} - V_{р.об} \leq V_{в.об}^{ср} \\ \text{иначе } V_{в.об}^{ср} \end{cases}; V_{п.об} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{у.об} - V_{р.об} \leq V_{в.об}^{ср} \\ \text{иначе } V_{у.об} - V_{р.об} - V_{в.об}^{ср} \end{cases}; \\ V_{ц.об} = \begin{cases} 0 & \text{при } V_{н.об} \leq V_{з.об} \\ \text{иначе } V_{н.об} - V_{з.об} \end{cases}; V_{о.об} = \begin{cases} V_{н.об} & \text{при } V_{н.об} \leq V_{з.об} \\ \text{иначе } V_{з.об} \end{cases}; \\ V_{т} = f(V_{у.об}, V_{д.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}); V_{в} = f(V_{в.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}); V_{ост} = f(V_{о.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}); \\ V_{пер} = f(V_{п.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}); V_{зав} = f(V_{з.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}); V_{цир} = f(V_{ц.об}, \bar{P}_{ио}, \bar{P}_{реж}) \end{array} \right. \quad (1)$$

где: $V_{в.об}^{ср}$ – средний объем горной массы, погруженный за оборот ИО;
 $V_{н.об}$ – объем непогруженной горной массы за оборот ИО.

Адекватность разработанной комплексной ММ оценивалась путем сравнения интегральных показателей, отражающих эффективность рабочего процесса погрузки горной массы ($P_{пог}, V_{в}, V_{пер}, V_{цир}$), полученных на основе модельных и экспериментальных исследований. Расхождения не превышали 20 %.

В четвертом разделе «Исследование влияния значений конструктивных, режимных параметров и структуры очистных комбайнов на производительность и энергоёмкость работы» приведены исследования влияния структуры и параметров ОК на эффективность его работы.

Исследования проводились на основе вычислительного эксперимента с учетом средней мощности пласта, сопротивляемости угля резанию и степени его хрупкости, диаметра и ширины захвата ИО, скорости подачи ОК и наличия дополнительных погрузочных устройств (погрузочного щитка с зазорами, зачистного лемеха или полноразмерного погрузочного щитка). Анализ эффективности работы ОК осуществлялся по: производительности разрушения, погрузки, переброса выгружающей лопастью и циркулирующей горной массы в рабочем объеме шнека; мощности на разрушение и погрузку горной массы ИО; удельным энергозатратам разрушения и погрузки горной массы ОК.

На основе результатов имитационного моделирования (рисунок 3) установлены характерные для ОК со шнеками малых диаметров три диапазона скоростей перемещения, отличающихся физической картиной процесса погрузки.

Первый диапазон, на котором производительность ОК не ограничивается погрузочной способностью шнека. На почве пласта при этом остается не превышающий вылета резца слой непогруженной горной массы. При работе ОК с погрузочным щитком с зазорами, непогруженная горная масса частично заполняет зазоры между погрузочным щитком и горным массивом. В случае использования зачистных лемехов или полноразмерных погрузочных щитков, непогруженная горная масса полностью заполняет зазоры и подается в рабочее пространство шнека в виде циркулирующей. При этом циркулирующая горная

масса в рассматриваемом диапазоне выгружается из рабочего объема ИО без ее накопления. Отношение мощности процесса погрузки $P_{\text{пог}}$ к мощности процесса разрушения не превышает 9...39 % в зависимости от свойств разрушаемого массива.

Во втором диапазоне производительность ОК также не ограничивается погрузочной способностью его ИО, однако объем непогруженной горной массы полностью заполняет зазоры между вынесенным в уступ забоя корпусом ОК и горным массивом. Скорость перемещения, соответствующая границе второго диапазона $V_{\text{II}}^{\text{заз}}$:

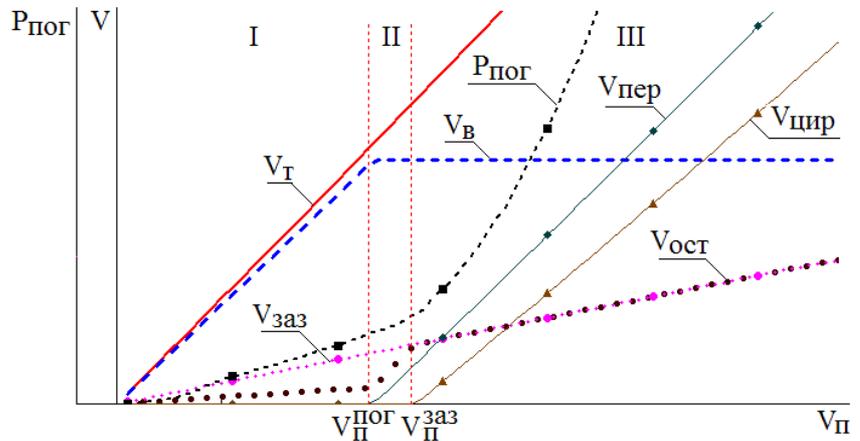


Рисунок 3. Графическое представление процесса погрузки

$$V_{\text{II}}^{\text{заз}} = V_{\text{В}} \cdot \left(D_{\text{ИО}} \cdot B_3 \cdot \rho \cdot \lambda^{-1} - S_{\text{заз}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

здесь: $S_{\text{заз}}$ – площадь зазоров дополнительного погрузочного устройства. При оснащении ОК зачистными лемехами или полноразмерными погрузочными щитками, выделенный диапазон отсутствует, что приводит к снижению максимальной скорости перемещения в зависимости от $D_{\text{ИО}}$ и B_3 в 1,1...1,3 раза. Отношение мощности процесса погрузки к мощности процесса разрушения находится в пределах 10...44 %;

В третьем диапазоне процесс погрузки сопровождается накоплением циркулирующей горной массы и интенсивным возрастанием напряженного состояния транспортируемой массы в рабочем пространстве ИО, следствием чего является значительное дополнительное переизмельчение и экспоненциальное увеличение мощности погрузки как функция скорости перемещения ОК. Отношение мощности процесса погрузки к мощности процесса разрушения составляет 27...82 %.

Работа ОК с постоянной скоростью перемещения в режиме циркуляции приводит к заштыбовке опережающего ИО, что обуславливает необходимость остановки ОК для ее ликвидации, и, как следствие, влечет за собой дополнительные затраты времени на технологические перерывы. Тогда зависимость для определения технической производительности комбайна $Q_{\text{тех}}$:

$$Q_{\text{тех}} = \frac{60 \cdot \bar{H}_{\text{пл}} \cdot B_3 \cdot \rho \cdot k_{\text{тех}}}{t_{\text{разг}} + t_{\text{раб}} + t_{\text{разш}}} \cdot \left[\int_0^{t_{\text{разг}}} V_{\text{II}}^{\text{разг}}(t) dt + V_{\text{II}} \cdot t_{\text{раб}} \right] \text{ при } V_{\text{II}} > V_{\text{II}}^{\text{заз}}, \quad (3)$$

где: $V_{\text{II}}^{\text{разг}}$ – функция скорости перемещения ОК при разгоне; $k_{\text{тех}}$ – коэффициент технического совершенства ОК; $t_{\text{разг}}$, $t_{\text{раб}}$, $t_{\text{разш}}$ – время разгона

ОК, работы до заштыбовки и на разштыбовку опережающего ИО соответственно.

Анализ результатов моделирования показал, что работа ОК со скоростями перемещения $V_{II} > V_{II}^{заз}$ обуславливает снижение технической производительности в 1,5...1,7 раза по сравнению с режимами работы, не приводящими к циркуляции. При этом максимальное значение $Q_{тех}$ достигается при минимальном значении B_3 .

Для выбора рациональных конструктивных, режимных параметров и структуры ОК обеспечивающих наибольшую техническую производительность при заданной мощности электродвигателя привода ИО $P_{ИО}^{уст}$ (штрихпунктирная)

или минимальной мощности на разрушение и погрузку горной массы при требуемом значении технической производительности $Q_{тех}^{г.ф.}$ (штриховая), а также при ограничении скорости подачи, например по скорости перемещения оператора в забое $V_{II}^{чел}$ (сплошная), была разработана номограмма (рисунок 4). Установлено, что максимальная техническая производительность при минимальной мощности и удельных энергозатратах разрушения и погрузки горной массы ОК, достигается при его работе с предельной скоростью перемещения до начала циркуляции разрушенной горной массы в рабочем пространстве ИО диаметром близким к средней мощности пласта с наименьшей из рассматриваемого ряда шириной захвата (т. А).

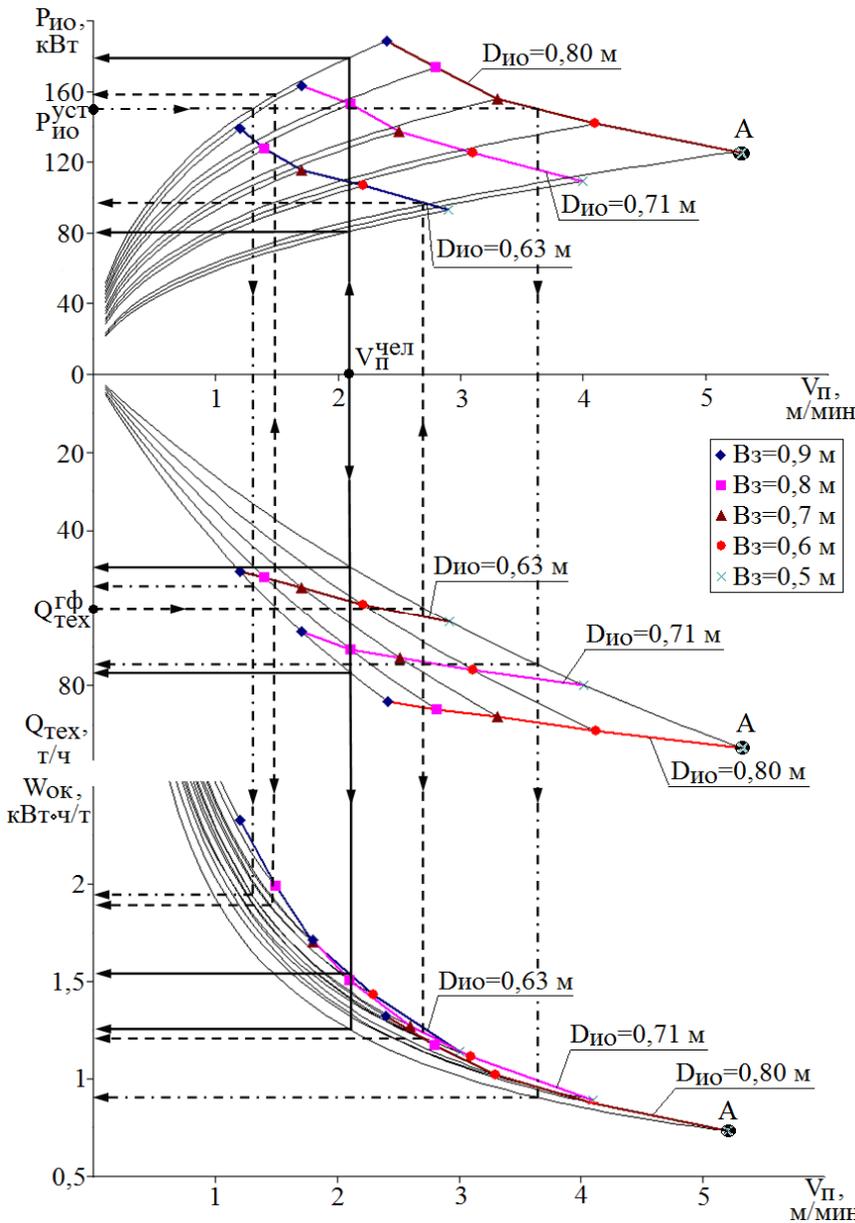


Рисунок 4. Номограмма выбора рационального диаметра и ширины захвата ИО рываемого ряда шириной захвата (т. А).

Пятый раздел «Обоснование параметров очистных комбайнов для тонких пологих пластов» посвящен разработке метода и ММ оптимизации

конструктивных, режимных параметров и структуры ОК со шнековым ИО малого диаметра.

Выбор рациональных геометрических и режимных параметров ОК, обеспечивающих наибольшую эффективность его работы, является многокритериальной задачей, решение которой противоречиво в виду значительного количества ограничивающих факторов, что требует разработки соответствующей ММ оптимизации. Задача оптимизации решалась методом свертывания частных критериев ($Q_{\text{тех}}$, $P_{\text{ио}}$, $W_{\text{ок}}$) в комплексный критерий качества. Формализовано ММ оптимизации может быть представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Найти } \bar{X}_n^{\text{opt}} (n=1, N_n) \text{ при которых } : T \rightarrow \max; \\ \bar{X} \in R_x^n, \bar{C}; \quad R_x^n \supset \bar{X} \left\{ \begin{array}{l} g_i(\bar{X}, \bar{C}) \leq 0, \quad i = \overline{1, N_i} \\ X_k^{\min} \leq X_k \leq X_k^{\max}, \quad k = \overline{1, N_k} \end{array} \right\} \end{array} \right\}, \quad (4)$$

здесь: \bar{X}_n^{opt} – n -ное оптимальное значение вектора параметров; T – комплексный критерий качества; \bar{X} – вектор переменных проектирования – параметры, оптимальные значения которых должны быть найдены в процессе оптимизации; \bar{C} – вектор постоянных проектирования; R_x^n – пространство проектирования, представляющее собой множество возможных (с учетом ограничивающих факторов) значений вектора переменных проектирования, из которых необходимо выбрать оптимальные значения. Это пространство задается в виде функций ограничений $g(\bar{X}, \bar{C})$, количество которых определяется факторами, ограничивающими возможные значения параметров проектирования; X_k^{\min} , X_k^{\max} – минимальное и максимальное возможные значения k -й составляющей вектора переменных проектирования.

На основе ММ оптимизации с использованием комплексной ММ рабочих процессов разрушения и погрузки горной массы шнеками малых диаметров, разработана методика выбора рациональной структуры и параметров ОК под конкретные условия эксплуатации. Результаты оптимизации ОК с учетом ограничивающих факторов представлены на рисунке 5.

Таким образом установлено, что в случае возникновения ограничений, связанных с горно-геологическими и горнотехническими условиями эксплуатации, необходимо рассматривать весь диапазон возможных значений $D_{\text{ио}}$ и B_3 для установления их рационального сочетания, обеспечивающего наибольшую техническую производительность при приемлемой энергоемкости работы ОК. Рациональные значения конструктивных, режимных параметров и структуры ОК под конкретные горно-геологические и горнотехнические условия обеспечат повышение $Q_{\text{тех}}$ в 1,1...2,1 раза, и снижению $P_{\text{ио}}$ и $W_{\text{ок}}$ в 1,3...1,5 и 1,3...2,3 раза соответственно.

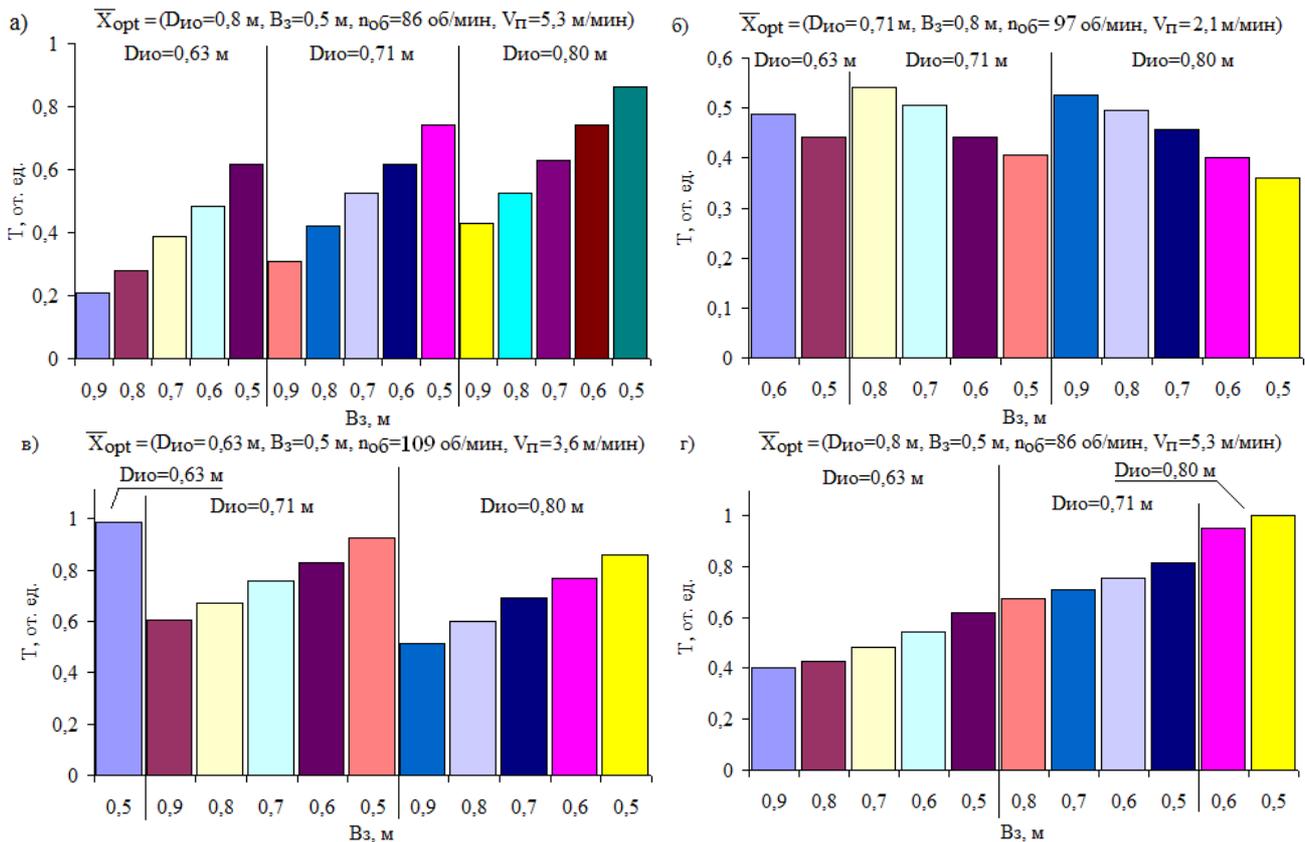


Рисунок 5. Результаты оптимизации параметров ОК с учетом ограничений: а) по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека; б) по скорости перемещения человека в забое; в) по производительности; г) по мощности электродвигателя привода ИО

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное народнохозяйственное значение, заключающееся в повышении технической производительности и снижении энергоемкости работы очистных комбайнов нового технического уровня в условиях тонких пологих пластов, путем оптимизации структуры, конструктивных и режимных параметров подсистемы погрузки очистного комбайна, на основе установленных закономерностей комплексного влияния этих параметров на процессы разрушения и погрузки.

На основе результатов научных исследований, сформулированы следующие заключения:

1. Впервые предложены метод и методика обработки результатов экспериментальных исследований работы современных ОК с индивидуальной подсистемой привода каждого ИО, позволяющие на основе значений действующих токов электродвигателей приводов резания определять энергоемкость процессов разрушения и погрузки горной массы шнековыми ИО малых диаметров.

2. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что мощность и удельные энергозатраты процесса погрузки с увеличением ширины захвата шнека возрастают тем интенсивнее, чем выше скорость перемещения

ОК. Этот рост обусловлен началом процесса циркуляции разрушенной горной массы, при этом, чем больше ширина захвата шнека, тем раньше этот процесс начинается и интенсивнее протекает. Экспериментально получены регрессионные зависимости мощности $P_{\text{пог}}$ и удельных энергозатрат $W_{\text{пог}}$ погрузки отделенной горной массы шнеками малого диаметра с различной шириной захвата B_3 от скорости перемещения комбайна $V_{\text{п}}$ экспоненциального вида:

$$P_{\text{пог}}(V_{\text{п}}, B_3) = k_1 \cdot B_3 \cdot e^{k_2 \cdot B_3 \cdot V_{\text{п}}}, \quad W_{\text{пог}}(V_{\text{п}}, B_3) = k_3 \cdot V_{\text{п}}^{-1} \cdot e^{k_2 \cdot B_3 \cdot V_{\text{п}}},$$

где: k_1, k_2, k_3 – коэффициенты регрессии, зависящие от конструктивных и режимных параметров ОК.

3. Разработана комплексная ММ процессов разрушения и погрузки горной массы ОК со шнеками малых диаметров, учитывающая влияние горно-геологических условий, геометрических параметров ИО и схемы набора режущего инструмента, режимных параметров работы комбайна на процесс разрушения горного массива, характер заполнения рабочего пространства шнека отделенной горной массой, наличие на пути перемещения потока выгружаемой горной массы препятствия в виде корпуса поворотного редуктора, борта забойного конвейера, а также сопротивления окна выгрузки, объемное напряженное состояние выгружаемой горной массы на процесс погрузки отделенной горной массы, отличающаяся учетом влияния циркулирующей горной массы в рабочем объеме шнека на процесс погрузки.

4. Впервые разработана ММ формирования потоков погруженной, переброшенной, циркулирующей и оставшейся на почве пласта горной массы, позволяющая с учетом влияния структуры, конструктивных и режимных параметров ОК определять значения производительности погрузки и объемов горной массы в единицу времени переброшенной выгружающей лопастью ИО, циркулирующей в рабочем объеме опережающего шнека и остатка на почве пласта после его прохода.

5. Характер и особенности рабочего процесса погрузки в существенной мере зависят от значения скорости перемещения ОК и их структурных параметров. При этом можно выделить три диапазона скоростей перемещения, отличающихся физической картиной процесса погрузки (1-й характеризуется свободной погрузкой; 2-й – перебросом непогруженной горной массы на нерабочую сторону шнека в виду ограниченной площади окна выгрузки; 3-й – циркуляцией горной массы, обусловленной ограниченной пропускной способностью зазоров дополнительного погрузочного устройства) и отношением мощности процесса погрузки к мощности процесса разрушения (в 1-м и 2-м диапазонах - (9...44) %, в 3-м - (27...82) % в зависимости от свойств разрушаемого массива).

Оснащение ОК зачистным лемехом или полноразмерным погрузочным щитком приводит к снижению остатка горной массы на почве пласта в 1,2...5,9 раза при интенсификации процесса циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека, что обуславливает отсутствие 2-го диапазона с уменьшением границы 1-го диапазона в 1,1...1,3 раза.

6. Предложена зависимость для определения технической производительности ОК, работающих в условиях тонких пологих пластов, учитывающая

затраты времени на вспомогательные технологические операции, обусловленные заштыбровкой шнека. Установлено, что техническая производительность ОК нелинейно снижается в 1,5...1,7 раза с увеличением скорости перемещения, выше ее граничного значения до начала циркуляции разрушенной горной массы в рабочем пространстве шнека.

7. Максимальная техническая производительность при минимальной мощности и удельных энергозатратах разрушения и погрузки горной массы достигается применением погрузочных щитков с зазорами при работе комбайна с граничной скоростью перемещения по условию отсутствия циркуляции горной массы в рабочем пространстве шнека диаметром близким к средней мощности пласта с наименьшей из принятого диапазона шириной захвата.

8. Разработана методика и ММ оптимизации структуры и параметров ОК под заданные горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации по критерию максимальной технической производительности при приемлемой энергоемкости процессов разрушения и погрузки горной массы, на основе установленных закономерностей комплексного влияния этих параметров на процессы разрушения и погрузки с учетом ограничивающих факторов. Установлено, что рациональные значения геометрических и режимных параметров и структуры комбайна обеспечат технической производительности в 1,1...2,1 раза, и снижению мощности и удельных энергозатрат разрушения и погрузки в 1,3...1,5 и 1,3...2,3 раза соответственно.

9. Результаты диссертационной работы приняты ГУ «ДОНУГЛЕМАШ» в качестве научно-методической основы для совершенствования и создания ОК для тонких пологих пластов. Предполагается, что использование результатов исследований диссертационной работы позволит в перспективе повысить эффективность работы ОК в составе механизированных комплексов в конкретных условиях эксплуатации при выемке тонких пологих пластов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Шабаев, О.Е. Методика определения удельных энергозатрат разрушения и погрузки очистных комбайнов для тонких пластов в реальных условиях эксплуатации [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаев, **П.П. Зинченко**, А.В. Мезников, А.В. Коваленко // «Вестник Донецкого национального технического университета». Донецк, 2017. – № 4. – С. 28 – 33. (*Методика обработки результатов эксперимента, получение регрессионных зависимостей*)

2. **Зинченко, П.П.** Тенденции повышения производительности очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов [Текст] / П.П. Зинченко // Вестник Донецкого национального технического университета». Донецк, 2019. – № 2. – С. 17 – 26.

3. Шабаев, О.Е. Установление зависимости погрузочной способности шнековых очистных комбайнов от их режимных параметров на основе модельных и натурных экспериментов [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, Е.Ю. Степаненко, **П.П. Зинченко** // «Вестник Донецкого национального технического университета». Донецк, 2019. – № 3 – С. 42 – 51 (*Зависимость погрузочной способности шнека от скорости подачи очистного комбайна*)

4. Шабаев, О.Е. К определению технической производительности очистных комбайнов работающих в условиях тонких и весьма тонких пологонаклонных пластов [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, Е.Ю. Степаненко, **П.П. Зинченко** // «Вестник Донецкого национального технического университета». Донецк, 2019. – № 4. – С. 44 – 52 (*Зависимость технической производительности от скорости подачи очистного комбайна*)

5. Шабаев, О.Е. Методика выбора параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров применительно к заданным горно-геологическим условиям [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, **П.П. Зинченко** // «Вестник Донецкого национального технического университета». 2020. – №3. – С. 43 – 51. (*Методика оптимизации параметров комбайна*)

6. Шабаев, О.Е. Обоснование рациональных структуры и параметров очистных комбайнов со шнеками малых диаметров [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, **П.П. Зинченко** // «Вестник Донецкого национального технического университета». 2021. – №1. – С. 20-28. (*Математическая модель оптимизации*)

7. Шабаев, О.Е. Экспериментальные исследования влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа комбайна на эффективность процесса погрузки [Текст] / О.Е. Шабаев, **П.П. Зинченко**, А.В. Мезников // Горные науки и технологии. 2019. – №2. – С. 90 – 103. (*Методика обработки результатов эксперимента, регрессионные зависимости*)

8. Нечепаяев, В.Г. Имитационная модель функционирования шнековых очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов [Текст] / В.Г. Нечепаяев, О.Е. Шабаев, Е.Ю. Степаненко, **П.П. Зинченко** // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 2 (65). Т.2. – С. 26 – 34. (*Математическая модель процессов разрушения и погрузки*)

Научные работы и тезисы докладов в материалах конференций

9. Шабаев, О.Е. Оценка влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа очистного комбайна для тонких пологих пластов на энергетические параметры машины [Текст] / О.Е. Шабаев, Е.Ю. Степаненко, **П.П. Зинченко** // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 4-й Межд. науч.-практ. конф. Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. ДонНТУ, г. Донецк, 2018 г. С. 47 – 50 (*Регрессионные зависимости мощности и удельных энергозатрат процесса погрузки*)

10. Шабаев, О.Е. Методика определения оптимальной ширины захвата шнекового исполнительного органа очистных комбайнов [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, **П.П. Зинченко** // Машиностроение и техносфера XXI века Донецк: сборник трудов XXV межд. науч.-практ. конф., 10-16 сентября 2018 г., Севастополь. Т. 2 – С. 237 – 243 (*Номограмма выбора рациональной ширины захвата шнека*)

11. Шабаев, О.Е. Обоснование параметров шнекового исполнительного органа очистных комбайнов для тонких пластов [Текст] / О.Е. Шабаев, **П.П. Зинченко**, Е.Ю. Степаненко, И.И. Бридун // Системы управления электротехническими объектами: сб. научных трудов 8-й Всероссийской науч.-практ. конф., 11-12 декабря 2018 г., ТулГУ, г. Тула. – С. 83 – 88 (*Методика определения рационального значения ширины захвата шнекового исполнительного органа*)

12. Шабаев, О.Е. Анализ процесса циркуляции угля в шнеках очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов [Текст] / О.Е. Шабаев, В.Г. Нечепаяев, **П.П. Зинченко** // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Межд. науч.-практ. конф. Т. 3: Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. Донецк: ДонНТУ, 2019. С. 138 – 142 (*Математическая модель процесса циркуляции, анализ полученных результатов*)

13. Шабаев, О.Е. Оценка влияния скорости подачи очистного комбайна на эффективность погрузки горной массы шнековыми исполнительными органами [Текст] / О.Е. Шабаев, И.И. Бридун, **П.П. Зинченко** // Проблемы горного дела: результаты 1-го Межд. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, 8-10 апреля 2020 г., Донецк. 2 секция: Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых подземным и открытым способом. Донецк: ДОННТУ. – С. 71 – 76 (*Зависимость погрузочной способности шнека от скорости подачи очистного комбайна, анализ полученных результатов*)

14. Шабаев, О.Е. Влияние дополнительных погрузочных устройств на производительность очистных комбайнов со шнеками малых диаметров [Текст] / О.Е. Шабаев И.И. Бридун, **П.П. Зинченко** // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 16-й Межд. конф., 19-20 ноября 2020 г., ТулГУ, г. Тула В 2 т. Т. 1 – С 187 – 194 (*Графическое представление процесса погрузки горной массы шнеком малого диаметра*)