



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 2020

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.
Выходит четыре раза в год

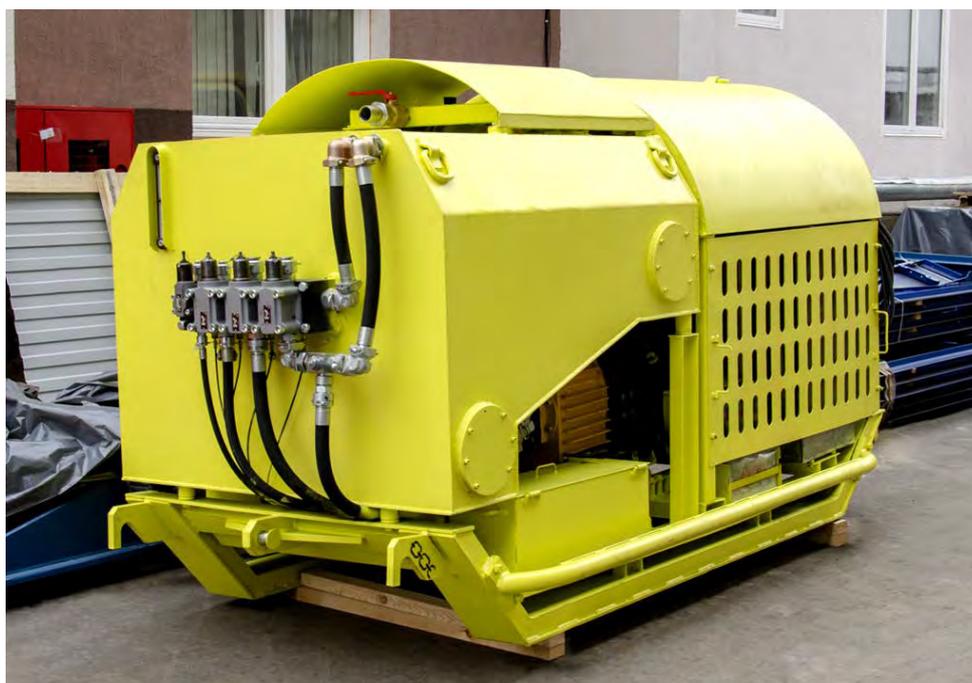
Редакция:

Главный редактор
Прушак Виктор Яковлевич

Заместитель главного редактора
Дворник Александр Петрович

Редакционная коллегия:

С.С. Андрейко (Россия), П.Н. Богданович (Беларусь), Ц. Вутов (Болгария),
В.А. Губанов (Беларусь), М.А. Журавков (Беларусь),
Н.П. Крутько (Беларусь), Е.И. Марукович (Беларусь), Ф.И. Пантелеенко (Беларусь),
Б.И. Петровский (Беларусь), В.К. Шелег (Беларусь), А.О. Шимановский (Беларусь)



Адрес редакции:

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь
Тел.: (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37
E-mail: onti@sipr.by

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Гец А.К., Петровский А.Б., Долгих А.С., Якимович А.М., Вишняк Б.А.** Концепция организации цифрового учета, прогнозирования и управления качеством калийной руды, подаваемой на обогащение, в ОАО «Беларуськалий» 5
- Гаврилкович Э.Г., Батура В.А., Орловский В.Ч., Оника С.Г.** Повышение безопасности взрывных работ на гранитном карьере «Микашевичи» 10

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Тройнич В.А.** Уравнения равновесия при уводе гусеничной машины и их исследование 17
- Гридюшко Д.В., Коднянко Е.В., Коднянко М.Ю.** Методика исследования погрузки руды шнековым исполнительным органом горной машины 23
- Приходько И.В., Бойков К.Р., Кошко А.Н.** Оценка надежности и безопасности электрических машин в рамках проведения сертификационных испытаний 37
- Вайтехович П.Е.** Самобалансировка ротора быстроходных ударных измельчителей 46
- Богданович П.Н., Коднянко М.Ю., Брундуков А.С., Стратанович В.А.** Износостойкость уплотнений буровых насосов из полиуретана, работающих в водной среде с абразивом 50
- Кондратчик Н.Ю., Высоцкая Н.А., Францкевич В.С.** Методы гранулирования НРК-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания 56

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Жигалов А.Н., Богдан Д.Д.** Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на структурно-фазовый состав и плотность дислокаций твердого сплава ВК8 71
- Лашкина Е.В.** Инсектицидная защитная пленка, модифицированная функциональными активными компонентами 82
- Неверов А.С., Доценко Е.И., Пантюхов О.Е.** Физико-химические свойства четырехкомпонентной системы «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт» 88
- Овчинников Е.В., Михайлов В.В., Чекан Н.М., Пинчук Т.И.** Структурные особенности нанокпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования 93
- Антонов А.С., Струк В.А., Авдейчик С.В., Абдуразаков А.А.** Методологические принципы модифицирования термопластичных матриц с целью повышения параметров эксплуатационных характеристик 101

На обложке: машина погрузочная для подземного склада руды МП-5СР.
На 1-й стр.: станция маслонасосная передвижная для автономного питания гидросистемы горных машин.
На 3-й стр.: шкив копровый.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.
Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

Ответственный секретарь А.В. Протасеня
Подписано в печать 05.03.2020 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².
Заказ 799. Усл. печ. л. 12,71. Тираж 120 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»,
ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 2020

Founder of the Journal:

JSC “Soligorsk Institute of Resources
Saving Problems with Pilot Production”

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998
Issued four times a year

Edition:

Editor-in-Chief
Prushak Viktor Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy
Dvornik Aliaksander Petrovich

Editorial Board:

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus), Tz. Voutov (Bulgaria),
V.A. Gubanov (Belarus), M.A. Zhuravkov (Belarus), N.P. Krutko (Belarus),
Ye.I. Marukovich (Belarus), F.I. Panteleenko (Belarus),
B.I. Petrovsky (Belarus), V.K. Sheleg (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



Editorial Address:

69, Kozlova street, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus
Tel: (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37
E-mail: onti@sipr.by

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building)
The journal is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2020

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

- Gets A.K., Petrovsky A.B., Dolgikh A.S., Yakimovich A.M., Vishnyak B.A.** Concept of organizing digital accounting, forecasting and quality management of potassium ore supplied for dressing in JSC “Belaruskali” 5
- Gavrilkovich E.G., Batura V.A., Orlovsky V.Ch., Onika S.G.** Improving the safety of blasting operations at the granite quarry “Mikashevichi” 10

MACHINE-BUILDING

- Kazachenko G.V., Basalai R.A., Troinich V.A.** Equations of equilibrium at slipping a track machine and their study 17
- Hrydziushka D.V., Kodnianka A.V., Kodnianka M.Yu.** Research methodology for the ore loading by the screw executive body of the mining machine 23
- Prihodzko I.V., Boikov K.R., Koshko A.N.** Assessment of the contribution of certification indicators in terms of reliability and safety of electric machines 37
- Vaitekhovich P.E.** Rotor self-balancing of quick-milling impact grinders 46
- Bogdanovich P.N., Kodnianka M.Yu., Brundukov A.S., Stratanovich V.A.** Wear resistance of drill pump seals made of polyurethane working in aqueous medium with abrasive 50
- Kondratchik N.Yu., Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S.** NPK fertilizer granulation methods. Granulation methods by pressing and roll briquetting 56

MATERIALS ENGINEERING

- Jigalov A.N., Bogdan D.D.** Research of the influence of the method of aerodynamic sound hardening on the structural-phase composition and the density of dislocations of WC8 carbide alloy..... 71
- Lashkina E.V.** Insecticidal protective film modified by functional active components 82
- Neverov A.S., Dotsenko E.I., Pantyukhov O.E.** Physical and chemical properties of a four-component system “water – glycerin – acetone – ethyl alcohol” 88
- Auchynnika Ya.V., Mikhailov V.V., Chekan M.M., Pinchuk T.I.** Structural features of nanocomposition coatings obtained by the electrospark method 93
- Antonov A.S., Struk V.A., Avdeychik S.V., Abdurazakov A.A.** Methodological principles of modifying thermoplastic matrices with a view to increasing the parameters of performance characteristics 101
-
-

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.363.2:658.562.4

Гец А.К.¹, Петровский А.Б.², Долгих А.С.², Якимович А.М.², Вишняк Б.А.³¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь²ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь³Группа компаний КАНЕКС, г. Москва, Россия**КОНЦЕПЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО УЧЕТА,
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КАЛИЙНОЙ РУДЫ,
ПОДАВАЕМОЙ НА ОБОГАЩЕНИЕ, В ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Аннотация. В статье рассмотрен организационно-технический подход управления качеством руды по заданным критериям управления в рамках цифровизации производства на горнодобывающем предприятии.

Ключевые слова: имитационное и математическое моделирование, критерии контроля, статистическая обработка и анализ данных, базы данных и управление ими, оперативный учет, моделирование и прогнозирование.

Gets A.K.¹, Petrovsky A.B.², Dolgikh A.S.², Yakimovich A.M.², Vishnyak B.A.³¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Belarus³KANEX group of companies, Moscow, Russia**CONCEPT OF ORGANIZING DIGITAL ACCOUNTING,
FORECASTING AND QUALITY MANAGEMENT OF POTASSIUM
ORE SUPPLIED FOR DRESSING IN JSC “BELARUSKALI”**

Abstract. The article discusses the organizational and technical approach to digitalization of operational management of a mining enterprise according to specified management criteria.

Keywords: simulation and mathematical modeling, control criteria, statistical processing and analysis of data, databases and their management, operational accounting, modeling and forecasting.

Введение. Стабилизация качества руды, подаваемой на обогащение, является одной из важнейших задач горно-обогатительных предприятий. Уменьшение колебаний качественного состава рудного сырья, поступающего на обогащение, ведет к повышению производительности предприятия и улучшению качества продукции при одновременном удешевлении производства.

Решением задачи стабилизации качества и количества руды, полностью удовлетворяющим требованиям обогатительной фабрики, является такое решение, при котором усреднение руды по всем показателям качества, влияющим на эффективность работы фабрики, осуществляется комплексно на всей технологической цепи «добыча – переработка». Такие решения дают более значимый эффект по сравнению с теми, которые решаются локально, по отдельным переделам этой цепи. В этой связи, на современном этапе разработка и внедрение комплексной автоматизированной системы управления качеством руды с использованием цифрового моделирования на базе сто-

хастических имитационных и математических моделей является актуальной и эффективной.

Основная часть. Комплексная автоматизированная система управления качеством руды (КАСУКР) состоит из двух АСУКР:

- АСУКР-1 подземного комплекса (рудника), рисунок 1 [1];
- АСУКР-2 поверхностного комплекса (отделения дробления, склада руды, обогатительной фабрики), рисунок 2 [2].

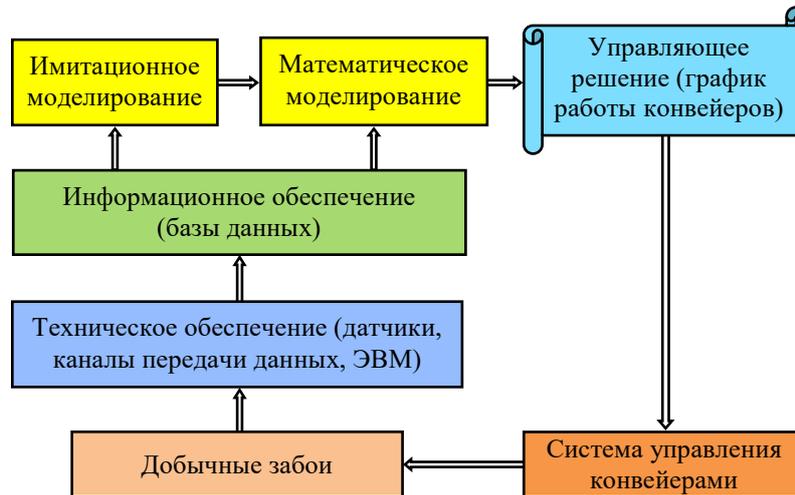


Рисунок 1. – Структура системы цифровизации учета добычи и прогноза качества руды при управлении горными работами калийного рудника

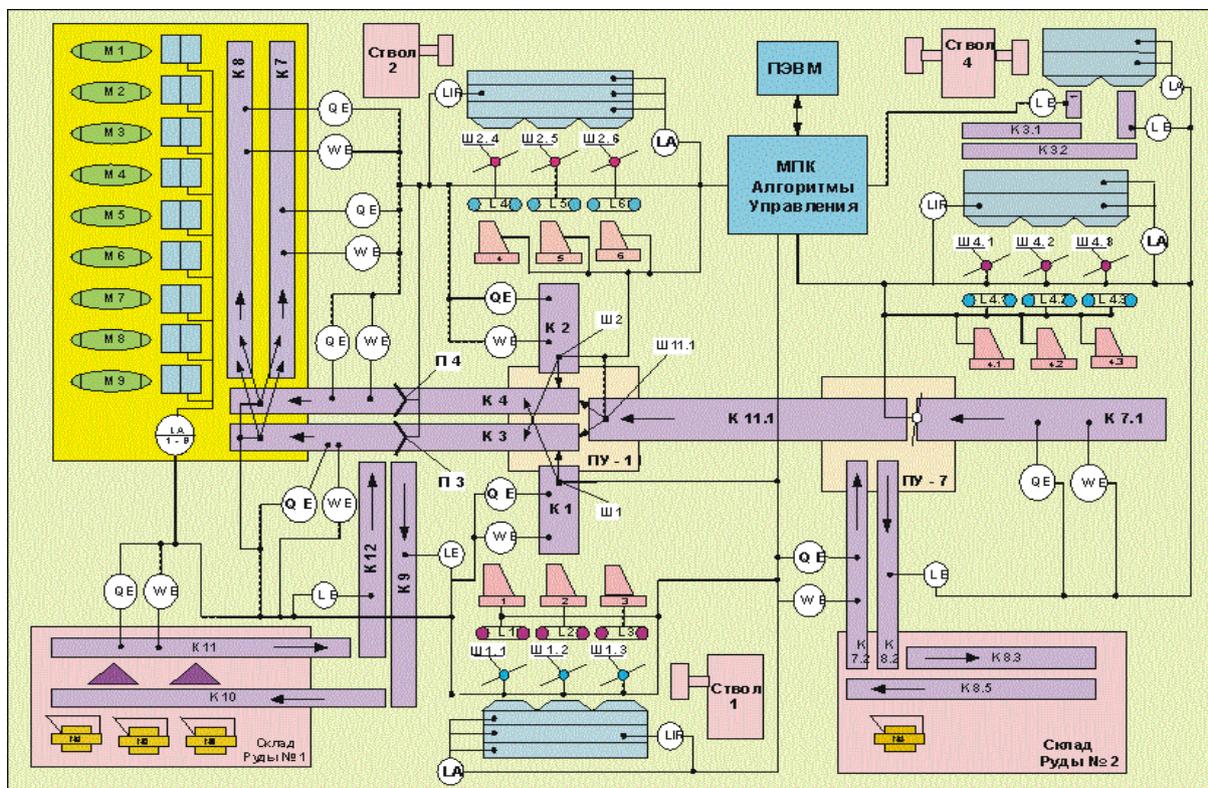


Рисунок 2. – Структура автоматизированной системы управления качеством руды поверхностного комплекса (отделения дробления, склада руды, обогатительной фабрики)

Обе системы объединяются в комплексную систему на единой базе данных, комплексе технических средств и программном обеспечении. Автоматизированные системы имеют одинаковую целевую функцию – минимум отклонения фактического показателя качества от планового или прогнозного.

В АСУКР-1 (рудника) стабилизация качества достигается в основном организационными мероприятиями, а в АСУКР-2 (поверхностного комплекса) – техническими. Но в той и другой системах стабилизация качества достигается на базе соответствующих программно-технических комплексов. Анализ производственных структур калийного рудника и фабрики, их существующий уровень управления показывают, что такие вероятностные, сложные и многомерные системы должны быть разработаны, исследованы и формализованы с использованием цифровых моделей на базе методов имитационного моделирования, математического программирования и других современных методов оптимизации технологических процессов.

В свою структуру система управления рудником должна включать следующие виды обеспечения:

- техническое (датчики оперативного учета параметров работы забоев, транспортных звеньев и необходимые надежные цифровые каналы передачи данных из забоев);
- информационное (базы данных);
- программно-алгоритмическое;
- организационное (инструкции, положения, обучение персонала и т.д.).

Работа АСУКР-1 состоит из двух этапов:

- на первом этапе на основе имитационных моделей вычисляются прогнозные технологические показатели работы забоев (качество, Н.О. (нерастворимый остаток), объемы горной массы), т.е. определяются качественно-количественные возможности каждого забоя;

- на втором этапе производится математическое моделирование конвейерной транспортной системы рудника [3, 4], представляющей собой сеть, объединяющую забои (источники руды), узлы (места перегрузки и слияния потоков руды) и приемные бункеры стволов (окончательная шихтовка руды перед выдачей на поверхность). В каждом узле производится расчет средневзвешенного качества, начиная от наиболее удаленных узлов. Результатом расчетов является средневзвешенное качество руды в приемных бункерах стволов.

Работа АСУКР-2 определяется особенностями работы отделения дробления. Отделение дробления – это сложный промышленный объект управления, включающий в себя: поверхностные бункеры стволов, накопительные бункеры отделения, приемные бункеры фабрики, склады, сложную систему перегрузочных узлов и шиберов, а также конвейерный транспорт, обеспечивающий перемещение рудных потоков. Достижение регламентных показателей руды по качеству и количеству при подаче ее на обогащение возможно в условиях калийных производств за счет рационального управления потоками руды, поступающей с различных горизонтов рудника, и рекомендуемого порядка складирования. Исходя из этого, задача управления данной системой формулируется следующим образом: посредством соответствующей системы управления (АСУКР-2) необходимо организовать распределение потоков руды от стволов и складов таким образом, чтобы при минимальных затратах подать на обогащение руду заданных качества и объема. Принцип работы системы – управление средневзвешенным качеством руды, подаваемой на обогащение, посредством изменения нагрузок от находящихся в работе источников руды (бункеров, складов, поточно-транспортной системы, шиберов и т.д.).

Работа этой системы основывается на программно-аппаратном комплексе, управляющем потоками руды, поступающей на обогащение, с помощью соответствующих исполнительных механизмов.

Работа также будет проходить в 2 этапа:

- на первом этапе на основе имитационных моделей вычисляются технологические показатели качества и объема руды, находящейся в текущий момент в приемных бункерах стволов на поверхности, в промежуточных бункерах, на конвейерах отделения дробления и на складе руды;

- на втором этапе производится математическое моделирование совокупности конвейеров, бункеров, складов руды, представляющей собой сеть, объединяющую источники руды, узлы (места перегрузки/слияния потоков руды) и приемные бункеры на входе СОФ (окончательная шихтовка руды перед выдачей в технологический процесс обогащения). В каждом узле производится расчет средневзвешенного качества, начиная от наиболее удаленных от СОФ узлов. Результатом расчетов является средневзвешенное качество руды в приемных бункерах СОФ.

Экономическая эффективность от стабилизации качества руды. Колебания качества руды, поставляемой на обогатительную фабрику, создают значительные трудности в ее обогащении, связанные с необходимостью изменять технологические режимы процесса обогащения, что приводит к увеличению затрат на переработку, ухудшает качество продукции (конечного концентрата), снижает извлечение при обогащении, приводит к росту себестоимости готовой продукции.

Отечественный и зарубежный опыт, аналитические расчеты и специальные эксперименты свидетельствуют о том, что уменьшение колебаний качественного состава рудного сырья, поступающего на обогащение, ведет к значительному повышению производительности предприятия и улучшению качества конечной продукции при одновременном удешевлении производства. Для калийного производства стабилизация качества руды по содержанию КС1 позволяет получить большой экономический эффект за счет повышения извлечения из руды полезного компонента, уменьшения расхода реагентов, снижения удельных расходов электроэнергии и топлива, уменьшения потерь КС1 с хвостами, снижения нагрузки на солеотвалы и шламохранилища и, в конечном счете – на окружающую среду.

Заключение. Учитывая актуальные наработки рудников и обогатительных фабрик ОАО «Беларуськалий», в части локальной автоматизации отдельных переделов технологических процессов и по результатам разработки и внедрения вышеизложенной концепции цифровизации учета, моделирования и прогнозирования параметров технологических процессов горного производства и подготовки горной массы к обогащению на базе современных методов и средств управления горно-обогатительным предприятием появляется возможность создания комплексной автоматизированной системы управления предприятием в режиме on-line, что позволит отслеживать работу каждого забоя, участка или горизонта в руднике и необходимых переделов обогатительной фабрики на соответствие заданным критериям управления.

Список использованных источников

1. Гец, А.К. К вопросу управления качеством руды на калийном руднике / А.К. Гец, С.Г. Оника // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 1. – С. 27-30.
2. Вишняк, Б.А. Технология обогащения и автоматизации процессов калийных флотационных фабрик // Б.А. Вишняк, А.А. Поздеев, М.Р. Турко // Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2011. – 240 с.

3. Компьютерное моделирование процесса динамического управления качеством руды на калийном руднике // А.К. Гец [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 7-13

4. Гец, А.К. Организация оперативного управления горными работами в условиях калийного рудника п/о «Беларуськалий»: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 08.00.05 / А.К. Гец; Московский горный институт. – М., 1978. – 18 с.

Информация об авторах

Information about the authors

Гец Анатолий Константинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Горные работы», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: bntu@bntu.by.

Gets Anatoly Konstantinovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, “Mining” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: bntu@bntu.by.

Петровский Андрей Борисович – начальник горного отдела, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Petrovsky Andrei Borisovich – Head of the Mining Department, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Долгих Александр Сергеевич – главный инженер РУ-3, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Dolgikh Alexander Sergeevich – Chief Engineer of RU-3, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Якимович Александр Михайлович – начальник управления информационных технологий, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Yakimovich Alexander Michajlovich – Head of Information Technology, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Вишняк Борис Андреевич – руководитель направления технологии обогащения и автоматизации процессов группы компаний КА-НЕКС (ул. 2-я Звенигородская, 13/37, г. Москва, Россия), e-mail: terbel@tut.by.

Vishnyak Boris Andreevich – Head of the Dressing and Process Automation Technology of the KANEX Group of Companies, (13/37, 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow, Russia), e-mail: terbel@tut.by.

Поступила в редакцию 04.11.2019 г.

УДК 622.235:658.345(476.7)(045)

Гаврилкович Э.Г.¹, Батура В.А.¹, Орловский В.Ч.¹, Оника С.Г.²¹РУПП «Гранит», г. Микашевичи, Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь**ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ
НА ГРАНИТНОМ КАРЬЕРЕ «МИКАШЕВИЧИ»**

Аннотация. В статье рассматриваются научно-технические решения, направленные на повышение безопасности и эффективности взрывных работ в карьере природного камня. Определены основные факторы, способствующие снижению разлета осколков породы при взрыве без увеличения зоны нерегулируемого дробления в обводненных породах с проточной водой.

Ключевые слова: буровзрывные работы, горные породы, разлет осколков, качество дробления, безопасность, зарядные рукава.

Gavrilkovich E.G.¹, Batura V.A.¹, Orlovsky V.Ch.¹, Onika S.G.²¹RUPE "Granit", Mikashevichi, Belarus²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus**IMPROVING THE SAFETY OF BLASTING OPERATIONS
AT THE GRANITE QUARRY "MIKASHEVICHY"**

Abstract. The article deals with scientific and technical solutions aimed at improving the safety and efficiency of blasting operations in the quarry of natural stone. The main factors contributing to the reduction of rock fragments scattering during explosion without increasing the zone of unregulated crushing in watered rocks with running water are determined.

Keywords: drilling and blasting, rocks, fragmentation, crushing quality, safety, charging sleeves.

Введение. В настоящее время карьер «Микашевичи» РУПП «ГРАНИТ» работает в условиях окружения его объектами различного назначения, технического состояния, сроков эксплуатации, требующих защиты от вредного разлета кусков породы при взрывах. Официальным документом, регламентирующим безопасное действие взрывов по разлету осколков, являются Единые правила безопасности при взрывных работах [1]. Правила устанавливают предельные границы безопасных расстояний (опасных зон) с учетом применяемого способа отбойки, величины линии сопротивления по подошве уступа и др. факторов. При взрывании удлиненных зарядов рыхления безопасные расстояния определяются степенью заполнения скважин взрывчатыми веществами (ВВ), применяемым диаметром, крепостью пород и расстоянием между скважинами. Принимается во внимание также степень заполнения скважин забойкой, наличие парносближенных скважин, уклон местности.

Анализ практики проектирования массовых взрывов [2] показывает, что применяемые методики определения параметров буровзрывных работ (БВР) ориентированы, прежде всего, на достижение требуемого дробления горной массы, необходимой высоты и ширины развала, а также размера кондиционного куска. При взрывании в стесненных условиях требования к качеству взрыва дополняются необходимостью обеспечения заданной дальности разлета кусков, что вносит определенные коррективы в их ра-

циональные параметры. Рациональные параметры буровзрывных работ, с позиции качественного дробления горных пород, влияющих на величину опасной зоны по разлету осколков, изменяются в определенных пределах. Теоретический выбор параметров буровзрывных работ в некотором диапазоне открывает возможности регулирования размеров опасной зоны путем изменения определяющих параметров в пределах установленных их рациональных величин.

В этой связи, выбор рациональных параметров буровзрывных работ в условиях их ограничения требованиями безопасности по условиям сейсмики и разлета кусков породы при взрыве является актуальной научной задачей.

Результаты исследований. Исследование безопасности взрывных работ проводилось для условий карьера «Микашевичи». По состоянию на конец 2019 года карьер «Микашевичи» достиг глубины 150 м. С применением взрывных работ разрабатывается 10 добычных уступов высотой, преимущественно, 12 метров. На отдельных участках рабочей зоны карьера на горизонтах +94 м и +82 м (северная и северо-восточная часть) из-за неровности кровли полезного ископаемого высота уступа колеблется от 7 до 20 м.

Вся толща скальных пород в контуре разработки относится к X-XI категории по СНиП (коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 15-20$), однако встречаются и более крепкие. По буримости породы относятся к XVIII-XX категории (труднобуримые), определенной по методике Центрального бюро промышленных нормативов по труду (ЦБНТ), а по взрываемости – к III-IV категории по Единой шкале взрываемости горных пород (трудновзрываемые и весьма трудновзрываемые).

Буровзрывные работы в карьере производятся с целью подготовки горных пород к выемке и последующего обеспечения дробильно-сортировочных заводов горной массой. Максимально допустимый размер кусков взорванной горной массы по условию экскавации и размещения в приемное отверстие дробилок составляет 1200 мм.

Скважины бурятся станками СБШ-250 МНА-32 и дизельной буровой установкой SandvikDI550 диаметром 250 мм, 220 мм, 165 мм и 152 мм.

Из-за большого водопритока водоносного горизонта кристаллических пород и трещиноватости пород большинство скважин обводнено. Высота водяного столба в скважинах изменяется от 3 до 15 метров. Ведение взрывных работ в карьерах выполняется в соответствии с Едиными правилами безопасности (ЕПБ) при взрывных работах. Взрывные работы в карьере должны обеспечить соблюдение безопасных расстояний при взрывных работах по действию сейсмических и ударных воздушных волн, а также по разлету отдельных кусков грунта.

Большое значение для повышения эффективности и обеспечения безопасности взрывных работ в карьерах имеет применяемая технология взрывных работ. На карьере «Микашевичи» реализована технология многорядного короткозамедленного взрывания с помощью технических средств неэлектрического инициирования взрыва «Искра» производства ОАО «Новосибирского завода «ИСКРА». Она представлена устройствами инициирующими ИСКРА-П и ИСКРА-С. Интервал замедления скважинных детонаторов устройств ИСКРА-С в карьере «Микашевичи» принят 450 мс и 500 мс. Применение в скважинах устройств с большими номиналами позволяет исключить подбой поверхностной сети, так все устройства ИСКРА-П срабатывают до инициирования зарядов в скважинах.

В карьере «Микашевичи» большинство скважин обводнены. При зарядании обводненных скважин расходуются эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ): нитрониты марок Э-70, Э-100, ВВПЭ «Нитробел», а также эмульсен-ГА. В нижней части относительно сухих скважин и в верхней части обводненных скважин применяются нитронит Э-50. Заряды размещаются в скважинах диаметром 250 мм, 220 мм и 170 мм. В ка-

честве промежуточных детонаторов для инициирования ВВ в скважинах используют шашки ЗТП-800, ТГ-500, ТГ-П850, ПТП-750, ПТУ-800Л, ПТУ-1000Л. Конструкция скважинного заряда – сплошная и рассредоточенная. Заряжение скважин ручное и механизированное. Забойка скважин выполняется забойной машиной ЗС-1М. При невозможности использования машин, забойка выполняется вручную. Забойным материалом служит отсев из материалов дробления фракций 0÷5,0 мм (опытная партия), песок. Число массовых взрывов в месяц 9-12, в год 108-144.

Следует отметить, что параметры БВР в типовом проекте рассчитаны по общепринятым формулам и в соответствии с действующими нормами и правилами. Вместе с тем, большое значение имеет практика их применения в условиях приближения к охраняемым объектам.

Из формулы для определения безопасного расстояния по разлету кусков породы, принятой в Единых правилах безопасности при взрывных работах [1], следует, что значительное влияние на разлет осколков оказывает степень заполнения скважины взрывчатым веществом l_3/L . Его максимальное значение, принятое в типовом проекте, составляет $16,4/22,5 = 0,73$. В проектах на проведение массовых взрывов имеются еще и большие значения заполнения скважин ВВ. В частности, при взрыве 15.02.2019 г. на блоке горизонта +82 м (скважина 40) значение l_3/L составило 0,75. Уменьшение коэффициента заполнения ухудшает дробление пород, но снижает разлет осколков. При понижении заполнения скважин до 0,65 (значение, принятое в типовом проекте при расчете опасной зоны) разлет осколков уменьшится в $0,75/0,65 = 1,15$ раз, при понижении заполнения до 0,54 опасная зона уменьшится в 1,39 раз ($0,75/0,54 = 1,39$).

Сложное влияние на разлет кусков породы при взрыве оказывает удельный расход и плотность заряжания. Формулу для расчета максимальной дальности разлета кусков, содержащуюся в Единых правилах безопасности при взрывных работах [1] не сложно преобразовать к виду:

$$r_{\text{разл}} = 1400\eta_3 \left(\frac{q}{\Delta} \right)^{0,25} \sqrt{\frac{f}{(1 + \eta_{\text{заб}})}},$$

где η_3 – коэффициент заполнения скважины взрывчатым веществом;

q – удельный расход взрывчатого вещества, кг/м³;

Δ – плотность взрывчатого вещества, кг/м³;

f – коэффициент крепости породы по шкале проф. М.М. Протождяконова;

$\eta_{\text{заб}}$ – коэффициент заполнения скважины забойкой.

Из формулы видно, что с увеличением плотности ВВ следовало бы ожидать некоторого уменьшения разлета $\Delta^{0,5}$, если оно не сопровождается увеличением удельного расхода более высокоплотного ВВ, отличающегося более низкой удельной энергией взрыва в сравнении с эталоном (граммонит 79/21 или аммонит № 6ЖВ). В нашем случае именно такая ситуация, т.к. применение высокоплотных ЭВВ влечет за собой увеличение удельного расхода ВВ для получения высокого качества дробления. Поэтому, для уменьшения разлета кусков породы при приближении к опасной зоне на расстояние 700 м и менее целесообразно рассмотрение вопроса о снижении удельного расхода ВВ за счет уменьшения диаметра скважин при сохранении прежней сетки скважин.

Значительное влияние на дальность разлета кусков породы оказывает степень заполнения свободной от заряда части скважины забойкой. При взрывании без забойки ($\eta_{\text{заб}} = 0$) дальность полета куска возрастает в 1,4 раза, увеличивая 500-метровую зону до 700 метров.

С использованием неэлектрической системы ИСКРА, внедренной на РУПП «Гранит», взрывчатое вещество можно эффективно инициировать с донной части скважины без спрессовывания ВВ (в отличие от донного инициирования детонирующим шнуром). Кроме того детонирующий шнур вызывает разрушение забойки при прохождении детонации через нее и повышенный разлет кусков при верхнем инициировании, что не характерно при применении неэлектрических систем инициирования.

Единые правила безопасности содержат немало ограничений по рассмотренным выше параметрам взрывов. Большинство требований правил выполняется, что оказывается достаточным для обеспечения безопасности объектов при удалении взрывааемых блоков от границы опасной зоны на расстояние, превышающее 800-1000 м, чему соответствует значительная часть площади карьера. В тоже время проектировщики взрывов, в ряде случаев, оставляют без внимания требование правил принимать при расчете максимальные значения коэффициента заполнения скважин, диаметра скважин, коэффициента крепости и наименьшие значения расстояния между скважинами или расстояния между рядами и коэффициента заполнения свободной от заряда части скважины.

Проектируемые взрывы призваны обеспечивать 500-метровую опасную зону по разлету кусков породы от технической границы ведения взрывных работ. Для принятых параметров взрывных работ (диаметр скважин, расстояние между скважинами в ряду или между рядами, заполнение забойкой свободной от заряда части скважины и др.) 500-метровая опасная зона при различном расстоянии от взрываемого блока до ее границы может обеспечиваться различной степенью заполнения скважин взрывчатым веществом. Максимальное заполнение скважины ВВ не должно превышать $2/3$ ее длины, что соответствует коэффициенту заполнения скважины 0,7. В таблице приведены значения коэффициента заполнения скважин ВВ. При других значениях параметров взрывов и условий их производства взрывааемых пород необходимая степень заполнения скважин ВВ определяется решением уравнения, определяющего величину разлета относительно $l_{зар}/l_c$.

Таблица. – Требуемое ограничение заполнения скважин ВВ при приближении взрывов к опасной зоне

Коэффициент крепости породы, f	Расстояние между скважинами, м	Расстояние от взрываемого блока до границы опасной зоны, м				
		500	550	600	650	700
20	Диаметр заряда 250 мм					
	4,5	0,54	0,59	0,64	0,70	0,70
	5,0	0,57	0,62	0,68	0,70	0,70
	5,5	0,59	0,65	0,70	0,70	0,70
	6,0	0,62	0,68	0,70	0,70	0,70
	Диаметр заряда 190 мм					
	4,5	0,62	0,68	0,70	0,70	0,70
	5,0	0,65	0,70	0,70	0,70	0,70
	5,5	0,68	0,70	0,70	0,70	0,70
	6,0	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70

Понижение коэффициента заполнения скважин взрывчатым веществом ведет к увеличению длины забойки, что обеспечивает более надежное запираение продуктов взрыва и предотвращение преждевременного их выброса из скважины. С другой сторо-

ны, увеличение длины забойки более 30 диаметров заряда приводит к ухудшению дробления горных пород, особенно в верхней части уступа, вследствие увеличения зоны нерегулируемого дробления горных пород. Поэтому, как следует из таблицы, ограничения разлета кусков породы целесообразно добиваться не только за счет радикального и одностороннего снижения коэффициента заполнения скважин ВВ, но и более «мягкого» ограничения, достигаемого уменьшением диаметра скважин с одновременным расширением сетки скважин. В частности, при сетке скважин 6,0×6,0 м в породах с коэффициентом крепости 20 снижение диаметра заряда до 190 мм позволяет применять нормальную длину заряда при уменьшении опасной зоны до 500 м.

Управление параметрами заполнения скважин ЭВВ в трещиноватых обводненных породах с проточной водой осложнено. Техническую возможность снижения разлета кусков и получения лучших результатов дробления путем уменьшения диаметра заряда при взрывании эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) в трещиноватых обводненных породах с проточной водой дает применение полипропиленовых зарядных рукавов.

Зарядные рукава, размещаемые в скважинах, пробуренных в трещиноватых горных породах, блокируют растекание ЭВВ по естественным трещинам массива и, вследствие этого, препятствуют опусканию колонки заряда и увеличению зоны нерегулируемого дробления.

Конструкция скважинного заряда с применением зарядных рукавов формируется сплошной с размещением двух промежуточных детонаторов (шашка-детонатор АЛБ-800) в верхней и нижней части заряда. Промежуточные детонаторы инициируются детонаторами неэлектрической системы. Диаметр зарядного рукава принят равным 190 мм, при диаметре скважины 250 мм.

Для определения технологической и экономической целесообразности применения полипропиленовых зарядных рукавов при зарядке скважин взрывчатым веществом промышленным «Нитронит» марки Э-70, произведенного на смесительно-зарядной машине Республиканского казенного предприятия «Центр утилизации артиллерийских и инженерных боеприпасов» в производственных условиях гранитного карьера «Микашевичи», произведено опытное взрывание зарядов с целью оценки их эффективности для последующего применения.

Зарядка скважин с применением зарядных рукавов осуществлялась на блоке, обуренном буровым станком СБШ-250 МНА-32, диаметром 250 мм. Испытания применения полипропиленовых зарядных рукавов проводились на горизонте +58 м (блок № 83) при высоте уступа 10,0 м, диаметре формируемого заряда 190 мм и сетке скважин 6,0×6,0 м. Рукава для зарядания ЭВВ отрезались на складе ВМ заранее, до завозки ЭВВ на блоки, длиной и количеством согласно «Проекту массового взрыва», при этом длина рукава принималась на 3 м больше средней глубины скважин.

Скважина, подготовленная к зарядке, имеет вид, показанный на рисунке 1.

Зарядка ЭВВ в рукава производилась следующим способом:

- в один из концов рукава закладывался кусок породы (или щебень фракции 5-20 мм) и завязывался на узел;



Рисунок 1. – Скважина, подготовленная к зарядке

- в скважину опускался рукав вместе с промежуточным детонатором;
- производилась механизированная зарядка ВВ в рукав с помощью зарядной машины со дна скважины;
- производилась установка второго промежуточного детонатора непосредственно в рукав в верхней части колонки заряда (при сильном обводнении скважины и невозможности установки промежуточного детонатора в рукав допускалась установка его вне рукава);
- производилась дозарядка ЭВВ в рукав и обрезание рукава у устья скважины, после чего производилась забойка.

Результаты разрушения горных пород на блоках с идентичными геологическими характеристиками представлены на рисунке 2.



**Рисунок 2. – Разрушение пород на блоках горизонта +82 м:
а – без применения рукавов; б – с применением рукавов**

На фотографиях отчетливо видно улучшение качества разрушения пород блока без образования негабаритных кусков в верхней части уступа, в зоне так называемого нерегулируемого дробления, при одинаковой расчетной дальности разлета кусков. По результатам проведенных испытаний установлено, что использование зарядных рукавов в скважинах, заряжаемых эмульсионными взрывчатыми веществами, является рациональным решением для разрушения горных обводненных пород с проточной водой при необходимости ограничения разлета кусков породы при взрыве.

Испытания рукавов зарядных при зарядании взрывных скважин позволили выявить ряд их преимуществ при взрывании в скважинах с проточной водой и применении эмульсионных ВВ:

- повышается однородность дробления горной массы по высоте уступа и снижается выход негабарита;
- достигается блокирование растекания и вымывания эмульсионного взрывчатого вещества по естественным трещинам массива в скважинах с проточной водой и, как следствие, неконтролируемое понижение колонки заряда в скважине;
- увеличивается производительность экскаватора при экскавации горной массы;
- повышается безопасность выемочно-погрузочных работ за счет уменьшения числа негабаритных кусков, особенно в верхней части уступа;
- снижается износ основных рабочих частей выемочного и транспортного оборудования (ковшей экскаваторов и кузовов автотранспорта);
- не требуется утилизация рукавов, так как она происходит во время взрыва.

Недостатком технологии является увеличение затрат труда по предварительной подготовке рукавов в соответствии с глубинами скважин, затрат времени на опускание рукавов в скважину и закрепление верхней части рукавов на поверхности.

Выводы. Повышению безопасности БВР за счет снижения разлета кусков породы в комплексе с удовлетворительным качеством дробления при взрывах в карьере способствует ограничение диаметра заряда без понижения высоты колонки заряда, которое в обводненных породах с проточной водой достигается применением полипропиленовых зарядных рукавов уменьшенного диаметра по сравнению с диаметром скважин. При незначительном увеличении затрат достигается сокращение расчетной опасной зоны без ухудшения качества дробления горных пород.

Список использованных источников

1. Единые правила безопасности при взрывных работах (в ред. приказа Проматомнадзора от 18.01.2000 № 5): утв. Госпроматомнадзор Республики Беларусь 29.05.1992. Зарегистрировано в Национальном реестре правовых актов Республики Беларусь 7.09.2000 г. № 8/3797.

2. Оника, С.Г. Взрывы вблизи объектов / С.Г. Оника. – Минск: Тэхнологія, 2006. – 183 с.

Информация об авторах

Гаврилкович Эдуард Геннадиевич – генеральный директор, РУПП «Гранит» (ул. Партизанская, 8, 225687, г. Микашевичи, Брестская область, Беларусь), e-mail: info@granit.by.

Батура Валерий Андреевич – главный инженер, РУПП «Гранит» (ул. Партизанская, 8, 225687, г. Микашевичи, Брестская область, Беларусь), e-mail: batura@granit.by

Орловский Вячеслав Чеславович – начальник технического отдела, РУПП «Гранит» (ул. Партизанская, 8, 225687, г. Микашевичи, Брестская область, Беларусь), e-mail: to@granit.by.

Оника Сергей Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Горные работы», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Information about the authors

Gavrilkovich Eduard Gennadievich – General Director, RUIE “Granit” (8, Partizanskaya Str., 225687, Mikashevichi, Belarus), e-mail: info@granit.by.

Batura Valery Andreyevich – Chief engineer, RUIE “Granit”, (8, Partizanskaya Str., 225687, Mikashevichi, Belarus), e-mail: batura@granit.by.

Orlovsky Vyacheslav Cheslavovich – Head of technical Department, RUIE “Granit”, (8, Partizanskaya Str., 225687, Mikashevichi, Belarus), e-mail: to@granit.by.

Onika Sergey Georgievich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Mining Engineering, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Поступила в редакцию 06.11.2019 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.232(075.8)

Казаченко Г.В.¹, Басалай Г.А.¹, Тройнич В.А.²¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь²ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь**УРАВНЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПРИ УВОДЕ
ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ**

Аннотация. Формируются уравнения равновесия гусеничной машины при движении с уводом в стационарном режиме. В основу способа составления уравнений положены закономерности математической теории трения проф. Ф.А. Опейко и особенности кинематики увода при разности скоростей скольжения гусениц. Приведены решения уравнений в некоторых частных случаях, позволяющих найти точные или приближенные решения.

Ключевые слова: гусеничная машина, уравнения равновесия, статический увод, силы трения, буксование.

Kazachenko G.V.¹, Basalai R.A.¹, Troinich V.A.²¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus**EQUATIONS OF EQUILIBRIUM AT SLIPPING
A TRACK MACHINE AND THEIR STUDY**

Abstract. The equilibrium equations of the tracked vehicle are formed when moving with the slipping in the stationary mode. The method of making equations is based on the laws of the professor F.A. Opeiko mathematical theory of friction and features of the kinematics of slipping at the difference of the slipping speeds of the tracks. The solutions of equations are given in some special cases, which allow to find exact or approximate solutions.

Keywords: tracked vehicle, equilibrium equations, static slipping, friction forces, skidding.

Введение. В предыдущей работе [1] авторами рассмотрены кинематические особенности равномерного движения двухгусеничной машины с уводом за счет разности сил трения между опорными ветвями гусениц и несущей поверхностью. Причинами увода могут быть также: неравномерность распределения нормального давления разноименных гусениц на несущее основание, различие его физико-механических характеристик под ними, нагрузки от навесного и прицепного оборудования и другое. Полученные зависимости для вычисления радиуса и угловой скорости такого движения содержат в качестве аргументов смещения центров вращения опорных ветвей гусениц, которые могут быть определены [1] из уравнений равновесия машины или кинематических соотношений между скоростями скольжения гусениц. Для нахождения скоростей скольжения необходимо исследовать уравнения равновесия. Такие уравнения можно составить, используя закономерности классического сухого трения, или с учетом зависимости напряжения трения от скорости скольжения. В настоящей работе уравнения

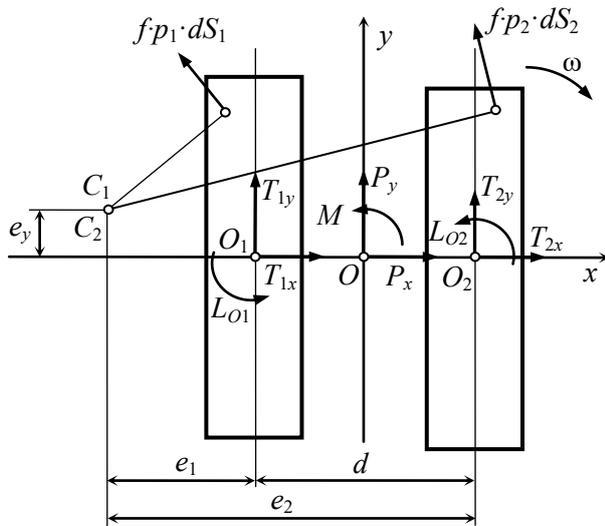
равновесия формируются на основании закона трения Кулона и математической теории трения плоских поверхностей профессора Ф.А. Опейко.

Содержание и результаты исследования. Как показано в работе [1], особенностью движения гусеничной машины с уводом является совпадение центров вращения опорных площадок гусениц. Следствием этого является соотношение между их боковыми смещениями:

$$e_2 = e_1 + d, \quad (1)$$

где e_1 и e_2 – боковые смещения центров вращения опорных площадок гусениц;
 d – поперечная база (колея) гусеничного движителя.

Уравнения равновесия двухгусеничной машины при совершении статического поворота, а движение гусеничной машины с уводом представляет частный случай такого поворота, могут быть записаны (рисунок 1) [2] в виде:



$$\begin{cases} M + L_{O1} + L_{O2} + (T_{2y} - T_{1y})d/2 = 0; \\ T_{1x} + T_{2x} + P_x = 0; \\ T_{1y} + T_{2y} + P_y = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где M – момент внешних сил относительно центра опорной поверхности;

L_{O1}, L_{O2} – моменты сил трения левой и правой гусениц относительно их геометрических центров;

$T_{1x}, T_{2x}, T_{1y}, T_{2y}$ – проекции равнодействующей сил трения гусениц о несущую поверхность;

P_x, P_y – проекции вектора внешних сил.

Рисунок 1. – Схема к составлению уравнений равновесия при уводе гусеничной машины

Внешние нагрузки M, P_x, P_y определяются взаимодействием исполнительных органов и других агрегатов гусеничной машины с горными породами, а также нагрузок другой природы, действующих на машину. Силы $T_{1x}, T_{2x}, T_{1y}, T_{2y}$ трения и моменты L_{O1} и L_{O2} , которые приведены к центрам опорных ветвей гусениц, определяются интегралами:

$$\begin{aligned} T_{1x} &= -\iint_{S_1} f \cdot p_1 \frac{(y_1 - e_y) dx dy}{\sqrt{(x_{C1} - x_1)^2 + (y_1 - e_y)^2}}; & T_{2x} &= -\iint_{S_2} f \cdot p_2 \frac{(y_2 - e_y) dx dy}{\sqrt{(x_{C2} - x_2)^2 + (y_2 - e_y)^2}}; \\ T_{1y} &= \iint_{S_1} f \cdot p_1 \frac{(x_{C1} - x_1) dx dy}{\sqrt{(x_{C1} - x_1)^2 + (y_1 - e_y)^2}}; & T_{2y} &= \iint_{S_2} f \cdot p_2 \frac{(x_{C2} - x_2) dx dy}{\sqrt{(x_{C2} - x_2)^2 + (y_2 - e_y)^2}}; \\ L_{O1} &= f \cdot p_1 \iint_{S_1} \frac{(y_1 - e_y) y_1 - (x_{C1} - x_1)(x_1 - x_{O1})}{\sqrt{(y_1 - e_y)^2 + (x_{C1} - x_1)^2}} dx dy; \\ L_{O2} &= f \cdot p_2 \iint_{S_2} \frac{(y_2 - e_y) y_2 - (x_{C2} + x_2)(x_{O2} - x_2)}{\sqrt{(y_2 - e_y)^2 + (x_{C2} + x_2)^2}} dx dy, \end{aligned} \quad (3)$$

где f – коэффициент трения гусениц о несущее основание;

S_1, S_2 – опорные площади левой и правой гусениц;

p_1, p_2 – давления гусениц на несущее основание;

x_1, x_2, y_1, y_2 – текущие координаты опорных площадок гусениц;

$x_{C1}, x_{C2}, y_C = e_y$ – координаты мгновенных центров вращения опорных площадок гусениц;

x_{O1}, x_{O2} – поперечные координаты центров опорных площадок гусениц.

Вычисление интегралов (3) может быть осуществлено различными способами, в том числе, и непосредственным их взятием из [3]. Опыт исследования поворота гусеничных машин показывает, что хорошие результаты дает использование приближенных формул:

$$\begin{aligned} L_o &= f \cdot P_z \left(\sqrt{r_s^2 + r_c^2} - r_c \right); \\ T &= f \cdot P_z \frac{r_c}{\sqrt{r_s^2 + r_c^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где r_c – радиус-вектор центра вращения относительно полюса трения, $r_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$;

r_s – статический радиус трения опорной поверхности;

P_z – нормальная нагрузка опорной площадки гусеницы на несущее основание, $P_z = S \cdot p$.

В теории поворота гусеничных машин система (2) обычно решается относительно боковых e_1, e_2 и продольного e_y смещений центров вращения опорных ветвей гусеничных лент от их геометрических центров. При этом значения сил и моментов трения, определяемые интегралами (3), заменяются их различными приближенными значениями.

Если воспользоваться приближенными значениями сил и моментов трения, а также учесть, что в этом случае $x_{C1} = e_1$, $x_{C2} = e_1 + d/2$ и воспользоваться свойствами моментов и проекций сил трения, то система (2) уравнений равновесия принимает вид:

$$\begin{cases} P_y - f \cdot p_1 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_1}{\sqrt{e_1^2 + e_y^2 + r_{S1}^2}} \right) - f \cdot p_2 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_1 + d}{\sqrt{(e_1 + d)^2 + e_y^2 + r_{S2}^2}} \right) = 0; \\ P_x + f \cdot p_1 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_y}{\sqrt{e_1^2 + e_y^2 + r_{S1}^2}} \right) + f \cdot p_2 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_y}{\sqrt{(e_1 + d)^2 + e_y^2 + r_{S2}^2}} \right) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где a, b – размеры опорной площади гусеницы.

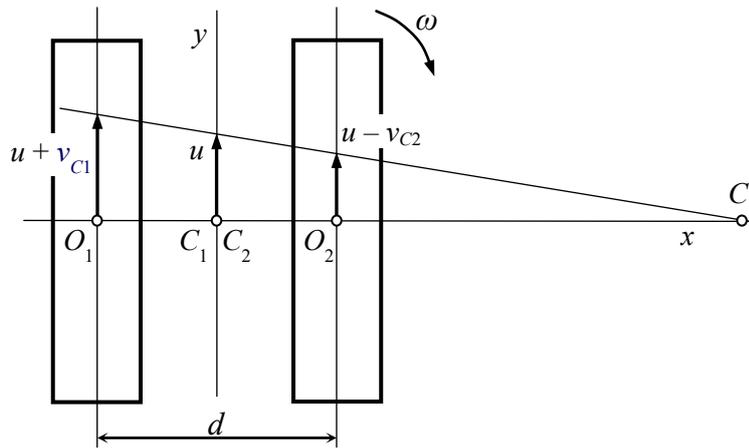
Мы записали только два уравнения, так как благодаря соотношению (1) в системе (2) осталось только два неизвестных: e_1 и e_y . Эта упрощенная система уравнений равновесия гусеничной машины при уводе все равно остается нелинейной и требует для нахождения решения применения численных приближенных методов. Тем не менее, эта система позволяет провести исследование некоторых частных случаев увода гусеничной машины. По аналогии с принудительным поворотом гусеничной машины за счет изменения скоростей перематывания гусениц рассмотрим простейший случай увода гусеничной машины, который понимается как простейший случай поворота.

В этом случае второе уравнение системы (5) примет вид:

$$f \cdot p_1 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_y}{\sqrt{e_1^2 + e_y^2 + r_{S1}^2}} \right) + f \cdot p_2 \cdot a \cdot b \left(\frac{e_y}{\sqrt{(e_1 + d)^2 + e_y^2 + r_{S2}^2}} \right) = 0, \quad (6)$$

так как $p_1 = p_2 = p$, $r_{S1} = r_{S2}$, а $P_x = 0$.

Уравнение (6) выполняется при условии $e_y = 0$. Тогда из первого уравнения системы (5) следует, что $e_1 = -d/2$. При этом в соответствии с [1] $e_2 = d/2$, и центры вращения опорных ветвей гусениц



u – скорость перематывания гусениц;
 v_{C1}, v_{C2} – скорости скольжения гусениц
 Рисунок 2. – Схема простейшего случая увода гусеничной машины

совпадают с центром опорной поверхности гусеничного хода. Такое движение гусеничной машины с уводом возможно (рисунок 2), когда одна гусеница буксует, а другая – юзит. Так как по условию проекции главного вектора внешних сил равны нулю, то продольные составляющие сил T_{1y} и T_{2y} трения между гусеницами и грунтом равны между собой и противоположно направлены (рисунок 2).

Момент, создаваемый этой парой сил, уравнивается моментом трения опорных

поверхностей гусениц относительно их полюсов трения, т.е.:

$$\frac{1}{2}(T_{1y} + T_{2y})d = L_{O1} + L_{O2}. \quad (7)$$

Так как по условию простейшего случая увода $T_{1y} = T_{2y} = T_y$, $L_{O1} = L_{O2} = L$, то окончательно имеем:

$$L = \frac{1}{4}T_y \cdot d. \quad (8)$$

Используя приближенные формулы (4) для вычисления момента и проекций равнодействующей сил трения, запишем:

$$L \frac{f \cdot p \cdot a \cdot b}{4\sqrt{a^2 + 4d^2}} = f \cdot p \cdot a \cdot b \left(\sqrt{r_c^2 + r_s^2} - r_c \right), \quad (9)$$

где $r_s \cong 0,125a$.

Учитывая значения e для простейшего случая увода, убеждаемся, что значения L , полученные из уравнения равновесия машин и с использованием закономерностей математической теории трения, отличаются весьма незначительно. Поэтому в практических расчетах для вычисления сил трения и их моментов относительно различных центров можно пользоваться приближенными формулами (4). При этом необходимо учитывать, что в реальных условиях работы горных машин на гусеничных движителях ситуации с простейшим случаем увода движителя маловероятны и практически не встречаются. Вместе с тем, рассмотрение такого увода дает представление о значениях величин, характеризующих движение горных гусеничных машин с уводом. Более пол-

но движение гусеничных горных машин с уводом может быть исследовано путем изучения решений системы уравнений (2) с использованием интегралов (3) или их приближенных значений (4). Современные методы и средства численных решений систем нелинейных уравнений позволяют найти решения системы (2) в том и другом случаях. На основании этой системы можно решать как прямую задачу механики, так и несколько других задач по изучению кинематики и энергетики движения горных гусеничных машин с уводом. При решении прямой задачи в уравнениях (2) в качестве неизвестных обычно выбираются координаты x_{C1}, x_{C2}, e_y центров вращения опорных ветвей гусениц.

Исследование движения горных гусеничных машин с уводом, на наш взгляд, можно выполнять с использованием зависимости скорости скольжения от силы трения между гусеницами и несущей поверхностью [4, 5].

Продольные составляющие T_{1y} и T_{2y} находятся решением уравнений равновесия машины в горизонтальной плоскости:

$$\begin{cases} T_{1y} + T_{2y} - P_y = 0; \\ (T_{2y} - T_{1y})d/2 + M = 0. \end{cases} \quad (10)$$

По найденным значениям T_{1y} и T_{2y} находим скорости скольжения гусениц:

$$v_{C1} = \frac{K_v \cdot \varphi_{C1} \cdot u}{K_v \cdot \varphi_{C1} + \sqrt{1 - \varphi_{C1}^2}}; \quad v_{C2} = \frac{K_v \cdot \varphi_{C2} \cdot u}{K_v \cdot \varphi_{C2} + \sqrt{1 - \varphi_{C2}^2}}, \quad (11)$$

где K_v – коэффициент пропорциональности между скоростью машины и поперечной скоростью деформации несущего основания;

$\varphi_{C1}, \varphi_{C2}$ – коэффициенты сцепления гусениц.

Кинематические характеристики поворота далее могут быть определены по зависимостям, приведенным в работе [1]. Для нахождения нагрузок на гусеничный движитель используются формулы (4).

Заключение. В выполненной работе сформулированы уравнения равновесия при движении горной гусеничной машины с уводом. Эти уравнения отличаются от классических уравнений равновесия гусеничного движителя отсутствием разности скоростей перематывания гусениц относительно корпуса машины. Анализ теории поворота гусеничного движителя и особенностей движения горных гусеничных машин позволил предложить методику исследования движения с уводом, основанную на закономерности скольжения гусениц по несущей поверхности.

Список использованных источников

1. Казаченко, Г.В. Кинематика увода гусеничного хода / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, А.И. Конопляник // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 50-53.
2. Опейко, Ф.А. Колесный и гусеничный ход / Ф.А. Опейко. – Минск: Издательство Акад. с.-х. наук БССР, 1960. – 228 с.
3. Давыдик, И.И. Исследование поворота гусеничного хода: дис. ... канд. техн. наук / И.И. Давыдик. – Минск, 1970. – 211 л.
4. Казаченко, Г.В. Взаимодействие опорных площадок ходовых устройств мобильных машин с несущим основанием / Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 50-55.

5. Казаченко, Г.В. Опорно-ходовые устройства горных машин / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Е.В. Щерба; под общ. ред В.Я. Прушака. – Минск: Энергопринт, 2016. – 207 с.

Информация об авторах

Казаченко Георгий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kazachenko@bntu.by.

Басалай Григорий Антонович – старший преподаватель кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: rbasalai@bntu.by.

Тройнич Виталий Александрович – аспирант Белорусского национального технического университета, технический директор ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Information about the authors

Kazachenko Georgi Vasilievich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, “Mining machinery” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kazachenko@bntu.by.

Basalai Ryhor Antonovich – Senior Lecturer, “Mining machinery” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: rbasalai@bntu.by.

Troinich Vitali Aleksandrovich – Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, Technical Director, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.

УДК 622.23.054.53(045)

Гридюшко Д.В., Коднянко Е.В., Коднянко М.Ю.*ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь***МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЗКИ РУДЫ
ШНЕКОВЫМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОРГАНОМ ГОРНОЙ МАШИНЫ**

Аннотация. В статье показаны зависимости погрузочной способности шнекового органа от его диаметра, шага лопасти и коэффициента трения. Проиллюстрирована модель максимально возможного заполнения органа с погрузочным щитком. Приведены формулы расчета скорости резания шнековым органом, скорости подачи, суммарной мощности привода и других параметров, необходимых для расчета погрузки шнековым исполнительным органом горной машины.

Определено основное условие правильного протекания процесса погрузки шнековым исполнительным органом: внутренний объем шнекового органа должен быть больше количества добычи руды, образующейся во время выемки.

Ключевые слова: шнековый исполнительный орган, очистной комбайн, скорость резания, погрузка, лопасти, скорость погрузки, опережающий орган, отстающий орган.

Hrydziushka D.V., Kodnianka A.V., Kodnianka M.Yu.*JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus***RESEARCH METHODOLOGY FOR THE ORE LOADING
BY THE SCREW EXECUTIVE BODY OF THE MINING MACHINE**

Abstract. This article shows the dependence of the loading capacity of the screw body on its diameter, blade pitch and friction coefficient. The model of the maximum possible filling of the body with the loading plate is illustrated. The formulas for calculating the cutting speed of the screw body, the feed rate, the total power of the drive and other parameters necessary for calculating the loading by the screw executive body of the mining machine are given.

The main condition for the correct flow of the loading process by the screw executive body is that the internal volume of the body is greater than the amount of production formed during the excavation.

Keywords: screw executive body, road header, cutting speed, loading, blades, loading speed, leading body, lagging body.

Введение. Машины со шнековыми транспортирующими органами широко применяются во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства в различных технологических процессах.

Одним из важнейших показателей эффективности работы шнека является его погрузочная способность. Здесь необходимо различать его погрузочную способность доставки непосредственно из забоя разрушаемой горной массы и последующую ее погрузку на забойный конвейер. Процесс погрузки, осуществляемый шнековым исполнительным органом, состоит из действий, заключающихся в зачерпывании горной массы, перемещении ее по вертикали и горизонтали, а также в высыпании ее на забойный конвейер.

В случае применения шнекового исполнительного органа количество транспортируемой горной массы растет вдоль захвата органа, из-за чего образуется нагромождение руды на выходе из межлопастного пространства. При работе в реверсивном направ-

лении куски руды перемещаются практически непосредственно вниз, либо диагонально в сторону высыпания из органа. Так как резцы осуществляют выемку руды с изменяемой глубиной среза, то количество руды, попадающей в пространство между лопастями, варьирует вдоль окружности органа. Поэтому могут появляться нарушения движения руды в результате ее скапливания в определенных зонах исполнительного органа.

Если скорость вращения шнекового органа будет слишком мала, то может произойти блокировка органа, так как транспортировка добытой при данной скорости руды может оказаться невозможной при помощи медленно движущихся лопастей. Следует обратить внимание на то, что степень заполнения органа материалом при определенной скорости подачи увеличивается при падении скорости вращения органа [1].

Шнековый орган осуществляет погрузку руды в вертикальном направлении относительно направления скорости подачи всей машины, а параметры процесса погрузки должны коррелироваться с параметрами процесса резания.

Перечисленные выше параметры, с одной стороны, влияют на нагрузку органа и выемочной машины, а, с другой, – на производительность и уровень погрузки материала.

Задача исследования заключалась в определении погрузочной способности шнекового исполнительного органа очистного комбайна и анализе сил сопротивления погрузке.

Исследование процесса погрузки руды шнековым исполнительным органом горной машины. Суммарная мощность N_{Σ} привода машины представлена в виде выражения:

$$N_{\Sigma} = N_c + N_K + N_T + N_x, \quad (1)$$

где N_c – потеря мощности при преодолении сопротивления резанию;

N_K – потеря мощности для подачи комбайна;

N_T – потеря мощности при транспортировке материала шнековым органом;

N_x – потеря мощности на холостом ходу машины.

В соответствии с экспериментальными данными потерю мощности при погрузке N_{Π} можно выразить как:

$$N_{\Pi} = (0,1 \div 0,15)N_{\Sigma}. \quad (2)$$

В этом случае момент погрузки будет равен:

$$M_{\Pi} = (16 \div 24) \frac{\pi D_{\text{ш}} N_{\Sigma}}{v_{\Pi}}, \quad (3)$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр шнека с резцами.

В результате исследований сопротивления погрузке, проведенных на испытательном стенде [2], было определено влияние скорости подачи v_{Π} и скорости резания v_p на значение момента погрузки.

Исследования проводились на шнековом двухзаходном исполнительном органе с захватом 0,6 м и диаметром 1,55 м, установленном на очистном комбайне, работающем в разрабатываемой лаве. Во время исследований измерялись кинематические параметры комбайна и момент вращения исполнительного органа.

Исследования проводились для двух скоростей резания (v_{p1} и v_{p2}) при постоянной толщине среза, поэтому можно записать:

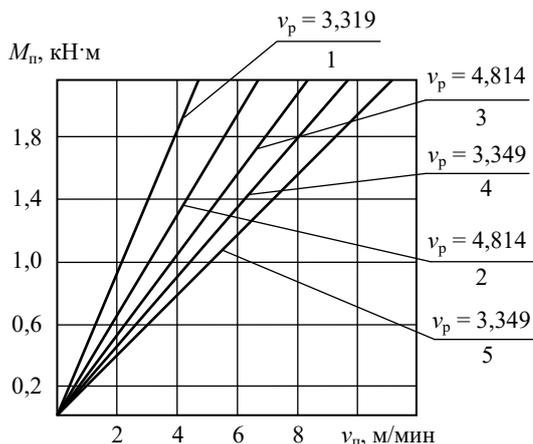
$$M_{\Pi} = M_{B1} - M_{B2}. \quad (4)$$

где M_{B1} и M_{B2} – определяют моменты выемки для v_{p1} и v_{p2} при глубине резания $r = \text{const}$ и $v_{p1} > v_{p2}$.

В результате проведенных исследований была получена зависимость для момента погрузки шнековым исполнительным органом:

$$M_{п} = 25000r(v_{п1}^{-0,31} - v_{п2}^{-0,31}). \quad (5)$$

Для исследуемого диапазона скоростей v_p и $v_{п}$ ($2 \div 7$ м/мин и $0 \div 5$ м/мин, соответственно) разработаны графики (рисунки 1-3). Из различных данных (рисунок 1) вытекают линейные зависимости момента погрузки от скорости подачи для разных скоростей резания. С ростом скорости резания сопротивление резанию уменьшается, что является следствием уменьшенного заполнения исполнительного органа добычей.



1, 2 – реверсивное вращение с погрузчиком;
 3 – однонаправленное вращение с погрузчиком;
 4 – реверсивное вращение без погрузчика;
 5 – однонаправленное вращение без погрузчика
 Рисунок 1. – Момент погрузки $M_{п}$ в функции скорости подачи $v_{п}$ для разных скоростей резания v_p

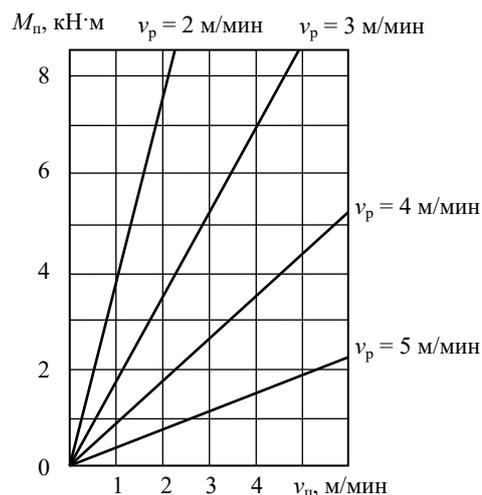


Рисунок 2. – Момент погрузки $M_{п}$ в функции скорости подачи $v_{п}$ для разных скоростей резания v_p

Применение погрузочного щитка увеличивает момент погрузки, что спровоцировано полной погрузкой добычи на конвейер, а, следовательно, лучшим заполнением шнекового исполнительного органа.

Однонаправленное вращение исполнительных органов характеризуется меньшим сопротивлением погрузке, что составляет примерно 30 % по отношению к реверсивному направлению.

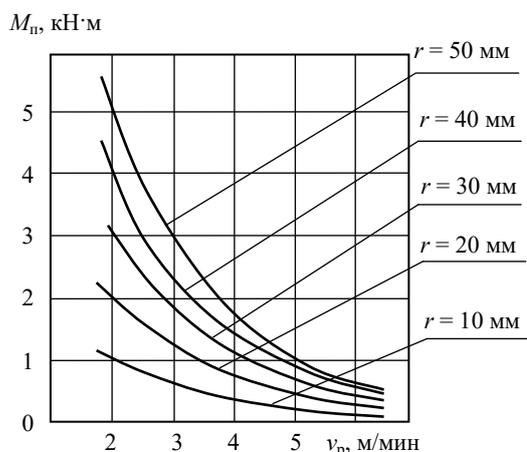


Рисунок 3. – Момент погрузки $M_{п}$ в функции скорости резания v_p для разных средних глубин резания r , приходящихся на один оборот органа

Рисунок 2 представляет также зависимость момента погрузки от скорости подачи для заданных скоростей резания, для диапазона $M_{п} = 0 \div 9$ кН·м и скорости подачи $v_{п} = 0 \div 6$ м/мин. Эта зависимость, как и в случае, показанном на рисунке 1, является линейной. Из графика (рисунок 3) следует, что увеличение скорости резания приводит к снижению сопротивления погрузке. Из сравнения моментов погрузки и выемки M_B следует, что в диапазоне скорости $v_{п} = 2 \div 5$ м/мин $M_{п}$ составляет примерно 13-60 % M_B .

На представленных ниже графиках, разработанных на основании экспериментальных исследований, показаны примерные зависимости, определяющие погрузочную способность шнека Q , соответственно, от диаметра (рисунок 4), от шага лопасти шнека (рисунок 5), от отношения $D_{ш}/b$ (рисунок 6), а также от коэффициента трения (рисунок 7).

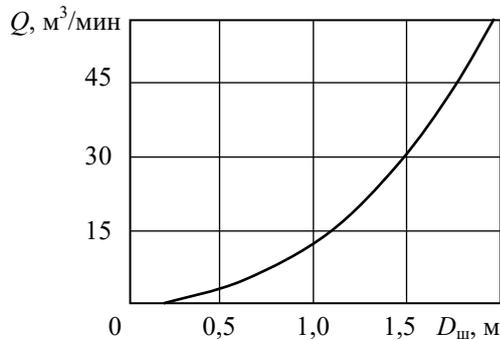


Рисунок 4. – Зависимость погрузочной способности органа от его диаметра

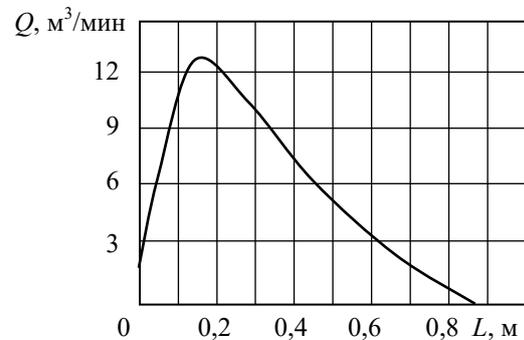


Рисунок 5. – Зависимость погрузочной способности органа от шага лопасти

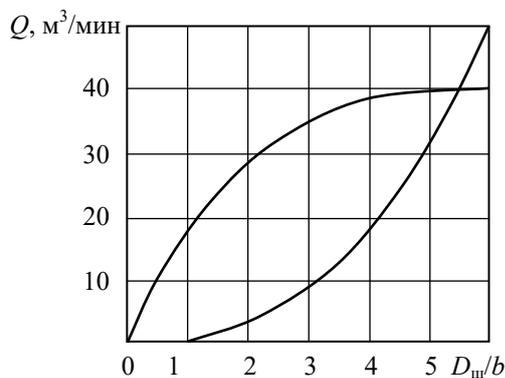


Рисунок 6. – Зависимость погрузочной способности органа от отношения диаметра органа к толщине лопасти $D_{ш}$ к толщине лопасти b

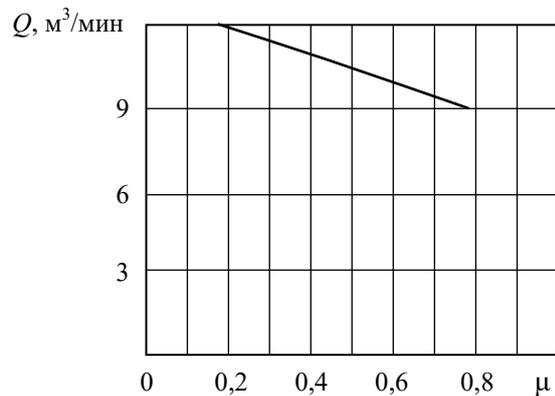
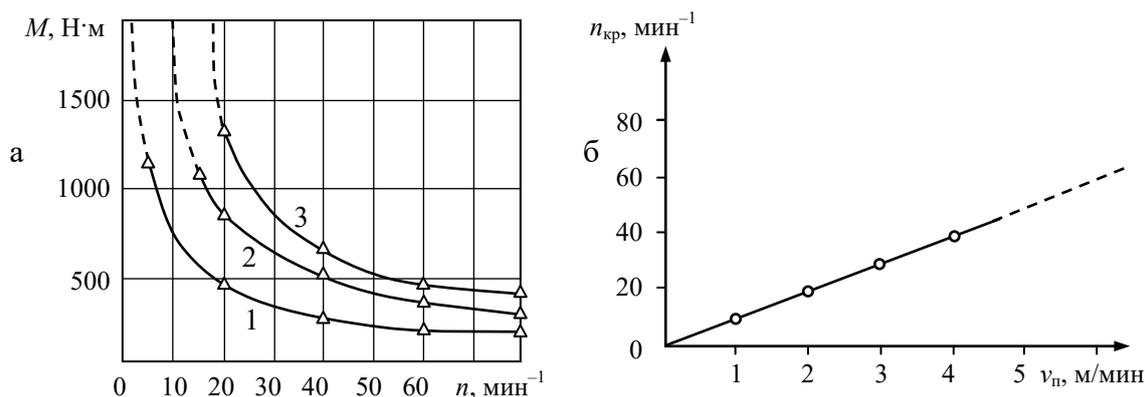


Рисунок 7. – Зависимость погрузочной способности органа от коэффициента трения μ

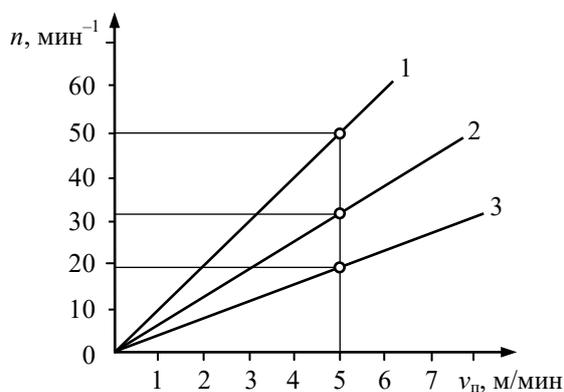
Зависимость процесса погрузки от скорости вращения органа описана, кроме прочих, характеристиками работы. Эти характеристики разработаны для разных скоростей подачи на основании зависимости момента вращения от количества оборотов органа (рисунок 8) [3].

После нанесения критических скоростей вращения для отдельных скоростей подачи, можно получить рабочую характеристику комбайна. Такая характеристика может быть разработана индивидуально для процесса погрузки руды (рисунок 8), либо выемки и погрузки вместе (рисунок 9). Из данного рисунка следует, что для исполнительных органов с диаметрами 2000, 1600 и 1300 мм, при заложенной скорости подачи 5 м/мин, скорости вращения для достижения работы органа без блокировки составляют соответственно 20, 30 и 50 оборотов в минуту. При более низких скоростях вращения произойдет значительное снижение момента вращения, и возрастет угроза блокировки органа. Для органов с большими диаметрами (1600 мм и 2000 мм) скорости вращения могут быть низкими. Применение слишком больших скоростей вращения ведет к образованию запыленности, разбрасыванию добычи и искрению во время контакта резца с разрушаемым массивом.



а – зависимость момента вращения M от частоты вращения n органа для разных скоростей подачи: 1 – $v_n = 2$ м/мин; 2 – $v_n = 4$ м/мин; 3 – $v_n = 6$ м/мин;
б – зависимость критической скорости вращения $n_{кр}$ от скорости подачи
 Рисунок 8. – Характеристика погрузки исполнительным органом с диаметром $D_{ш} = 1300$ мм и захватом $Z = 750$ мм

На процесс погрузки имеют также влияние часто исключаемые в анализе горно-геологические условия в разрабатываемой выработке. Процесс погрузки руды особенно затруднен в случае ведения выемки по падению, то есть в случае наличия в лаве поперечного наклона. Погрузку добычи шнековыми органами в таких лавах можно улучшить путем наклона лопастей органа в направлении выхода из органа (рисунок 10). Наклон лопастей исследуемых исполнительных органов с диаметром 2000 мм составил 15°. При поперечном наклоне забоя на 9÷14° установлено увеличение производительности на 10-15 % по отношению к выемке исполнительными органами с лопастями, установленными перпендикулярно оси вращения.



1 – $D_{ш} = 1300$ мм; 2 – $D_{ш} = 1600$ мм; 3 – $D_{ш} = 2000$ мм
 Рисунок 9. – Рабочая характеристика исполнительных органов с разными диаметрами

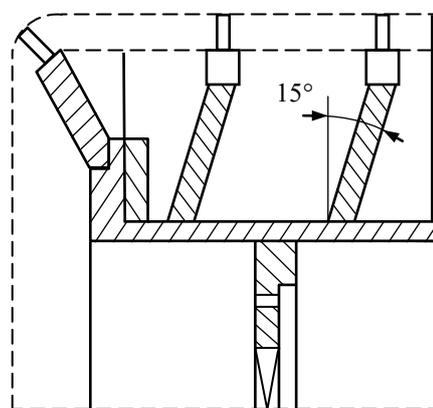


Рисунок 10. – Схема исполнительного органа с наклонными в сторону разгрузки лопастями

Для улучшения процесса погрузки можно также применить исполнительные органы с изогнутыми лопастями. Такие органы имеют лопасти, посаженные перпендикулярно к корпусу, причем с ростом радиуса органа увеличивается наклон лопасти в направлении выхода из органа.

Похожего эффекта можно достичь, например, благодаря конусной форме погружного щитка исполнительного органа. При перпендикулярной установке лопастей к этой поверхности достигается наклон в сторону выработанного пространства. В ре-

зультате этого образуется вертикальная составляющая сила в направлении погрузки добычи, приводящая к подъему материала в процессе его движения.

Разработка лав валовым способом ведется комбайнами с одним или двумя исполнительными органами, которые характеризуются тем, что корпус комбайна выдвинут за пределы конвейера в пространство захвата. По этой причине руда, добытая опережающим шнеком, должна эффективно погружаться на конвейер.

Так как при валовой выемке диаметр исполнительного органа соответствует высоте лавы, скорость подачи комбайна является единственным параметром, при помощи которого в подземных условиях можно согласовать производительность выемки с производительностью погрузки.

При разработке лав селективным способом существует технологическая возможность согласования количества добычи, погружаемой исполнительным органом, осуществляющим выемку нижнего слоя полезного ископаемого, с производительностью погрузки этого органа. Это следует из возможности подбора таких диаметров исполнительных органов для определенной высоты лавы, которые обеспечат в требуемой степени погрузку нижним исполнительным органом добычи, выходящей из нижнего слоя полезного ископаемого высотой $(H - D_{ш})$, а также части добычи, незагруженной верхним исполнительным органом.

Оптимальная скорость подачи комбайна $v_{п\text{ опт}}$ составляет:

$$v_{п\text{ опт}} = \frac{60v_p F_{п}}{\pi D_{ш}^2 k_b}, \quad (6)$$

где k_b – коэффициент влияния высоты просвета между поворотным редуктором и конвейером.

Учитывая следующие зависимости:

$$F_{п} = F_c - F_p - F_{тр\text{ к}} - F; \quad (7)$$

$$F_c = \frac{\pi D_{ш}^2}{4}, \quad (8)$$

получено:

$$v_{п\text{ опт}} = \frac{15v_p}{k_b} \left(1 - \frac{F_p + F_{тр\text{ к}} + F}{F_c} \right), \quad (9)$$

где v_p – скорость резания, м/с;

$F_{п}$ – поперечное сечение исполнительного органа с диаметром D , при помощи которого добыча погружается на конвейер, м^2 ;

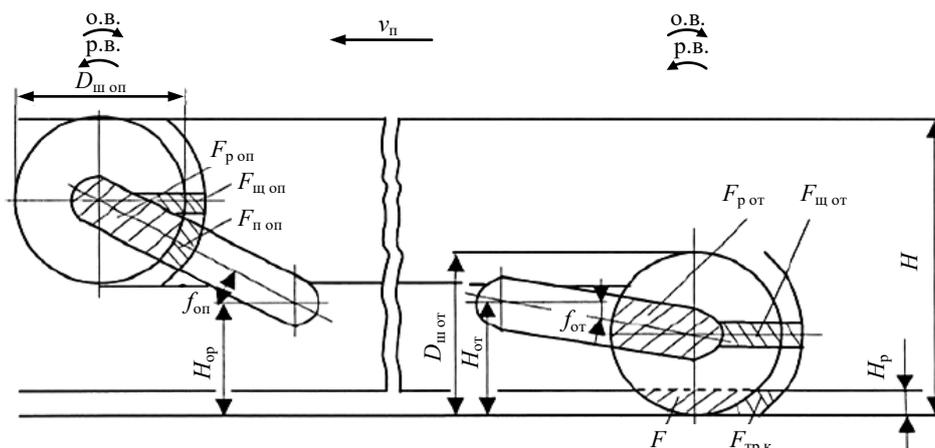
F_c – поперечное сечение исполнительного органа с диаметром D , м^2 ;

F_p – поперечное сечение части исполнительного органа, перекрытой отклоняющимся поворотным редуктором, м^2 ;

$F_{тр\text{ к}}$ – поперечное сечение части исполнительного органа, перекрытого трассой конвейера, м^2 ;

F – часть поперечного сечения исполнительного органа, занятая рециркулирующей в органе добычей, м^2 .

На рисунке 11 представлена схема системы поворотных редукторов комбайна в положении обычной работы, позволяющей определить свободное пространство в опережающем и отстающем исполнительных органах, через которые добыча может размещаться на конвейер. Рассмотрены случаи работы шнеков без или с погрузочными щитками при разных направлениях их вращения.



о.в. – однонаправленное вращение; р.в. – реверсивное вращение;
 Рисунок 11. – Схема системы поворотных редукторов для определения свободного пространства опережающего и отстающего исполнительных органов

Выражения, позволяющие определить величину свободного пространства, выглядят следующим образом:

- опережающий орган без погрузочного щитка:

$$F_{оп} = 0,25\pi k_{н.оп} (D_{ш оп}^2 - d_{оп}^2) - F_{р оп}; \quad (10)$$

- отстающий орган без погрузочного щитка:

$$F_{от} = 0,25\pi k_{н.от} (D_{ш от}^2 - d_{от}^2) - (F_{р от} + F); \quad (11)$$

- опережающий орган с погрузочным щитком:

$$F'_{оп} = 0,25\pi k_{н.оп} (D_{ш оп}^2 - d_{оп}^2) - (F_{р оп} + F_{п оп} + F_{щ оп}); \quad (12)$$

- отстающий орган с погрузочным щитком:

$$F'_{от} = 0,25\pi k_{н.от} (D_{ш от}^2 - d_{от}^2) - (F_{р от} + F_{щ от} + F + F_{тп к}), \quad (13)$$

где $k_{н.от}, k_{н.оп}$ – коэффициенты наполнения, учитывающие, что в процессе погрузки, в зависимости от направления вращения, участвует часть поверхности, вытекающая из сечения органа;

$F_{щ}$ – поперечное сечение щитка.

Значения коэффициентов $k_{н.от}$ или $k_{н.оп}$ следует принимать в функции направлений вращения органов и применения (или нет) погрузочных щитков. Из анализа рисунка 11 следует, что $k_{н.от}$ для органов с погрузочными щитками принимает максимальное значение 0,75, невзирая на направление вращения и место работы органа. В случае отсутствия погрузочных щитков для органа с реверсивным направлением вращения $k_{н.от} = k_{н.оп} = 0,5$, а с однонаправленным вращением – $k_{н.от} = k_{н.оп} = 0,75$.

Скорость погрузки добычи (эффективность выемки), с одной стороны, и производительность выемки органа, с другой, должны соответствовать следующей зависимости:

$$V_{в(оп,от)} \leq F_{(оп,от)} v_{пр(оп,от)} i_{(оп,от)}, \quad (14)$$

где $v_{пр}$ – продольная скорость добычи;

оп, от – индекс анализируемого исполнительного органа – опережающий (оп) или отстающий (от).

Определяя скорость $v_{пр}$, в функции шага L и количества лопастей i , а также количества оборотов органа n , зависимость (14) можно записать следующим образом:

$$V_{в(оп,от)} \leq F_{(оп,от)} L_{(оп,от)} n_{(оп,от)} i_{(оп,от)}, \quad (15)$$

и тогда выражение, определяющее поверхность F , примет следующий вид:

$$F \geq \frac{V_{в}}{L \cdot n \cdot i}. \quad (16)$$

В работах [4] представлено описание модели процесса погрузки, где установлено, что основным условием правильного протекания процесса погрузки шнековым исполнительным органом является требование, чтобы внутренний объем органа был больше количества добычи, образующейся во время выемки, при выполнении условий, вытекающих из эмпирических исследований. В то же время, поток добычи, выходящий из органа на конвейер, должен иметь такой объем, чтобы свободное пространство обеспечивало его свободное протекание. Достаточным условием является анализ этих явлений во время одного оборота органа.

Внутренним объемом органа V_o является свободное пространство между лопастями шнека, в котором добыча перемещается в направлении конвейера. Величина этого пространства должна быть такой, чтобы обеспечить перемещение и свободное движение материала к пункту разгрузки. Если объем пространства между лопастями шнека рассматривать как разницу объема шнека с диаметром $D_{ш}$, объема вала ступицы с диаметром d_c и объема лопастей, то для органа с так называемыми нормальными лопастями внутренний объем V_o описывается отношением:

$$V_o = 0,25\pi (D_{ш}^2 - d_c^2) \left(Z_{ш} - \frac{b}{\cos \alpha_2} \right), \quad (17)$$

а для органов с перекрестными лопастями – отношением:

$$V_o = 0,25Z_{ш} (D_{ш}^2 - d_c^2) \left(\pi - \frac{ib}{D_{ш} \sin \alpha_2} \right), \quad (18)$$

где $Z_{ш}$ – захват органа без отрезного диска (выемочно-погрузочной части);

$D_{ш}$ – диаметр шнека;

d_c – диаметр ступицы органа;

b – толщина лопасти;

i – количество лопастей;

α_2 – угол подъема лопасти.

Как было отмечено, основной задачей вышеуказанной модели является выполнение следующего соотношения:

$$\Delta = k_n V_o - V_{в} \geq 0, \quad (19)$$

где Δ – разность между объемом внутреннего рабочего органа и скоростью погрузки добычи;

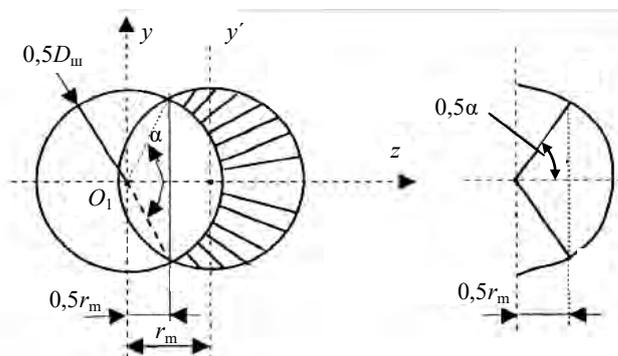
k_n – коэффициент наполнения исполнительного органа.

Допуская, что все параметры исполнительного органа имеют правильные значения, принимая во внимание качество процесса погрузки, невыполнение неравенства (19) повлечет за собой снижение эффективности погрузки вплоть до возможности блокировки исполнительного органа. Особое влияние на значение Δ имеют диаметр и обороты органа, а также скорость подачи комбайна. Из этого следует, что для определенной высоты лавы и диаметра исполнительного органа следует тщательно подбирать максимальную скорость подачи комбайна и частоту вращения исполнительного органа, а также обдумать возможность применения погрузочного щитка.

Для органа с параметрами $D_{ш} = 2,0$ м, $d_1 = 1,6$ м и $d_c = 0,9$ м коэффициент $k_{ц} = 1,9794$, а для $D_{ш} = 1,4$ м, $d_1 = 1,0$ м и $d_c = 0,9$ м, тот же коэффициент $k_{ц}$ составит 1,1152 (d_1 – диаметр основания конуса ступицы; $k_{ц}$ – коэффициент определяемый как отношение объема, иного, чем объем вала, к объему вала с диаметром ступицы d_c , если ступица имеет другую форму).

Спирали шнека представляют собой отрезки винтовых поверхностей и, соответственно, делятся на правые или левые. С целью уравнивания реактивных моментов, действующих со стороны забоя, на двухшнековых комбайнах шнеки, как правило, вращаются в разные стороны. Чтобы при этом обеспечить одинаковое направление потока разрушаемой горной массы, комбайны комплектуются шнеками левым и правым.

Эффективность выемки органа V_B приходящаяся на один его оборот, зависит от захвата Z , диаметра $D_{ш}$, количества оборотов n и скорости подачи $v_{п}$ (рисунок 12) [5]. Дополнительно следует учесть, что добыча увеличивается в объеме после отделения



α – средний угол;
 r_m – максимальная глубина резания
 Рисунок 12. – Поперечное сечение среза шнекового органа

от пласта, что характеризует коэффициент разрыхления добычи k_p , а также факт частичной погрузки добычи без участия исполнительного органа (коэффициент k_q).

Тогда для опережающего исполнительного органа:

$$V_{в\text{оп}} = \frac{k_p k_q Z_{\text{оп}} v_{п} D_{ш\text{оп}}}{n_{\text{оп}}}, \quad (20)$$

и отстающего:

$$V_{в\text{от}} = \frac{k_p k_q (H - D_{ш\text{оп}}) Z_{\text{от}} v_{п}}{n_{\text{от}}}. \quad (21)$$

Суммарная эффективность опережающего и отстающего исполнительных органов V_B является суммой $V_{в\text{оп}}$ и $V_{в\text{от}}$:

$$V_B = V_{в\text{оп}} + V_{в\text{от}} = k_p k_q v_{п} \left[\frac{Z_{\text{оп}} D_{ш\text{оп}}}{n_{\text{оп}}} + \frac{(H - D_{ш\text{оп}}) Z_{\text{от}}}{n_{\text{от}}} \right]. \quad (22)$$

Для шнековых органов с одинаковыми параметрами отношение (22) принимает следующий вид:

$$V_B = \frac{k_p k_q Z v_{п} H}{n}. \quad (23)$$

Учитывая соблюдение неравенства (19), следует рассмотреть случай работы комбайна с погрузочными щитками или без них. Для работы органов с погрузочными щитками необходимым и достаточным является условие: эффективность выемки, приходящаяся на один оборот опережающего шнекового органа, должна быть меньше погрузающей способности этого органа:

$$\Delta = k_H V_{о\text{оп}} - V_{в\text{оп}} \geq 0. \quad (24)$$

Тогда из отношения (24) можно получить выражение, определяющее допустимую скорость подачи $v_{п}$:

$$v_{п} \leq \frac{k_H n V_{о\text{оп}}}{k_p k_q Z_{\text{оп}} D_{ш\text{оп}}}. \quad (25)$$

В случае работы выемочной машины без погрузочных щитков, необходимо обеспечить выполнение следующего неравенства:

$$\Delta = k_n(V_{o_{оп}} - V_{o_{от}}) - (V_{в_{оп}} + V_{в_{от}}) \geq 0. \quad (26)$$

Получаем выражение для допустимой скорости подачи $v_{п}$ для органов с разными параметрами:

$$v_{п} \leq \frac{k_n n_{оп} n_{от} (V_{o_{оп}} + V_{o_{от}})}{k_p k_q [Z_{оп} D_{ш_{оп}} n_{от} + (H - D_{ш_{оп}}) Z_{от} n_{оп}]} \quad (27)$$

или с одинаковыми параметрами:

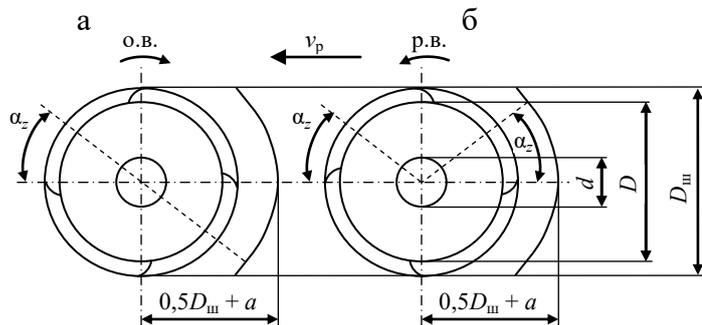
$$v_{п} \leq \frac{2k_n V_o n}{k_p k_q ZH}. \quad (28)$$

Очевиден факт, что зависимости (24) и (26) можно трансформировать произвольным образом и определять, соответственно, другие необходимые параметры органов, однако чаще всего в действительности возможно изменение, заключающееся в ограничении скорости подачи.

Коэффициент наполнения исполнительного органа k_n для работы комбайна без погрузочных щитков на основании промышленной практики принимается 0,3 как для вращения в разных направлениях, так и для однонаправленного вращения. В случае применения погрузочных щитков значение этого коэффициента может быть большим (рисунок 13). Однако следует стремиться к тому, чтобы на этапе проектирования или подбора исполнительных органов использовать значение k_n как для работы без погрузочных щитков.

Применение погрузочных щитков улучшает эффект погрузки, не оставляя добычу на почве. Если предположить, что только сальвинитовая мелочь погружается погрузочным щитком, то должно накопиться ее достаточное количество для того, чтобы лопасти могли его перенести на конвейер. Такая ситуация может произойти, если предположить, что исполнительный орган работает так, как будто погрузочного щитка нет. В противном случае, количество добычи, скопившейся в полости погрузочного щитка, больше, и скорость ее отведения определяет: возрастет ли сопротивление погрузке и насколько. Кроме того, в отдельных случаях может произойти запирание транспортируемого материала в исполнительном органе.

Параллельно, в этой ситуации происходит переизмельчение добычи, так как исполнительный орган начинает работать как измельчитель. Поэтому следует избегать такой ситуации, подбирая параметры $v_{п}$, n , k_n и V_o и, применяя погрузочный щиток, наклоненный под углом α_z (рисунок 14). Тогда составная скорости подачи $v_{пт}$ будет содействовать отведению добычи из пространства между исполнительным органом и погрузочным щитком без участия первого.



а – вращение в одном направлении $k_n = 0,5$;

б – реверсивное вращение $k_n = 0,7$;

α_z – угол естественного ссыпания добычи

Рисунок 13. – Модель возможного максимального заполнения органа с погрузочным щитком

Рекомендуется, чтобы минимальное расстояние погрузочного щитка от исполнительного органа a составляло g_{\max} (максимальную глубину резания), чтобы избежать переизмельчения добычи во время процесса погрузки.

В зависимости от направления вращения шнекового исполнительного органа отбитый материал располагается определенным образом (рисунок 15). При встречном вращении шнека (от почвы к кровле) по отношению к скорости подачи (рисунок 15а) основная масса отбитой породы падает вниз и подается шнеком на забойный конвейер, оставаясь в рабочем пространстве. В этом случае устраняется излишнее переизмельчение материала.

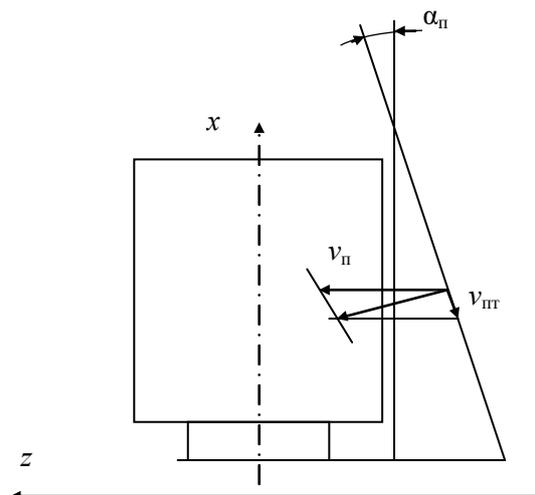


Рисунок 14. – Схема исполнительного органа с наклонным погрузочным щитком

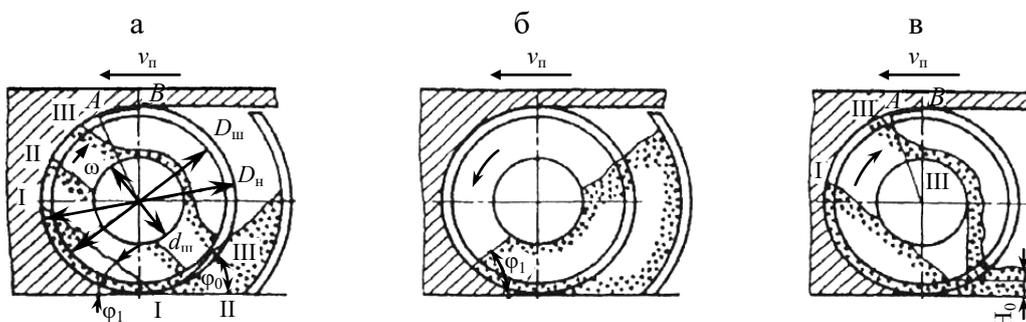


Рисунок 15. – Схема размещения потока материала в шнековом исполнительном органе с погрузочным щитком в зависимости от направления вращения органа

При попутном вращении шнека (от кровли к почве) по отношению к скорости подачи (рисунок 15б) основная масса погружаемого материала располагается со стороны погрузочного щитка, образуя угол φ_1 относительно почвы пласта [6]. По мере увеличения подачи поток погружаемого материала увеличивается, так как скорость потока, зависящая от частоты вращения, числа заходов и шага шнека, остается постоянной. Возможен момент, когда материал будет скатываться на обечайку шнека и перекидываться в зону погрузочного щитка. Кроме того, отбиваемая в верхней части забоя порода (рисунок 15а, 15в, дуга АВ) при вращении от почвы к кровле попадает в заднюю зону. Здесь она либо остается на почве пласта (при отсутствии погрузочного щитка, рисунок 15в), увеличивая высоту непогруженного слоя H_0 , либо будет собираться щитком, подаваться шнеком на конвейер, а частично – увлекаться в зону рабочего пространства, образуя циркулирующий материал.

При встречном вращении с ростом скорости подачи увеличивается площадь потока материала, расположенного в рабочем пространстве шнека. Увеличение высоты потока приводит к росту циркуляции материала. Кроме того, перемещение материала вдоль оси шнека при его транспортировании сдерживается тем, что в этом случае ложем для движения служит забой с поперечными бороздами следов резания. Борозды снижают осевую скорость потока и увеличивают его циркуляцию. При попутном вращении (рисунок 15б) ложе потока образовано почвой и погрузочным щитком. Щит распо-

лагается дальше, чем забой относительно шнека. Поэтому при равной производительности шнеков по отбойке высота потока в этом случае ниже, благодаря чему снижается его циркуляция. Вместе с тем, увеличение площади потока снижает скорость последнего.

Конструктивные и режимные параметры шнековых исполнительных органов, принятые по условиям резания, как правило, имеют большие запасы по погрузочной способности, начиная с диаметра 1,1÷1,2 м и более. Шнек диаметром 0,8÷1,0 м обеспечивает удовлетворительное транспортирование горной массы из забоя. Однако, при погрузке горной массы на забойный конвейер с высотой борта более 200 мм должны учитываться размеры погрузочного окна между корпусом комбайна и решеточным ставом забойного конвейера, наличие дополнительных погрузочных устройств (щитки, лемехи и др.), технологическая схема работы (с зачисткой почвы на обратном ходу, лемехом конвейера) и др. факторы.

Во всех случаях производительность шнека по погрузке $Q_{\text{ПГ}}$ должна быть не более производительности шнекового исполнительного органа по разрушению забоя Q :

$$Q_{\text{ПГ}} \leq Q. \quad (29)$$

Производительность шнека по погрузке определяют по формуле:

$$Q_{\text{ПГ}} = \rho \frac{\Phi}{K_p} F v_{\text{ос}}, \quad (30)$$

где ρ – плотность породы, кг/м³;

Φ – коэффициент заполнения рабочего пространства конвейера;

K_p – коэффициент разрыхления породы исполнительным органом;

F – площадь поперечного сечения рабочего пространства шнека, м²;

$v_{\text{ос}}$ – осевая скорость движения материала, м/с.

Осевую скорость $v_{\text{ос}}$ движения материала можно определить из соотношения:

$$v_{\text{ос}} = \frac{h_{\text{в}}}{t_{\text{об}}} K_{\text{ц}}, \quad (31)$$

где $h_{\text{в}}$ – шаг шнека, м;

$t_{\text{об}}$ – время одного оборота шнека, с;

$K_{\text{ц}}$ – коэффициент, учитывающий циркуляцию материала в шнеке.

Так как

$$F = \frac{\pi(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{с}}^2)}{4},$$

то окончательно имеем:

$$Q_{\text{ПГ}} = \rho \frac{\pi}{4} \frac{\Phi}{K_p} K_{\text{ц}} h_{\text{в}} n (D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{с}}^2), \quad (32)$$

где $D_{\text{ш}}$ – диаметр шнека по лопастям, м;

$d_{\text{с}}$ – диаметр ступицы шнека, м.

Рассмотрение процесса погрузки горной массы шнековым исполнительным органом с энергетической стороны с учетом затрат мощности на перемещение горной массы и ее трение о лопасть шнека позволяет определять мощность на погрузку по следующей формуле:

$$N = \frac{f f_{\text{с}} \pi g Q l (D_{\text{ш}} - d_{\text{с}})}{2 K_{\text{ц}} h_{\text{в}} \omega 1000 \eta}, \quad (33)$$

где f – коэффициент трения между горной массой и почвой;

$f_{\text{с}}$ – коэффициент трения горной массы о металл;

l – расстояние перемещения горной массы, м;

ω – угловая скорость шнека, рад/с;

η – коэффициент полезного действия.

Коэффициент заполнения ϕ принимается равным 0,2 ... 0,25 при работе без погрузочных щитков и – 0,4 ... 0,5 при работе с погрузочными щитками.

Изменяя величину h_b и в допустимых пределах величину n , связанную с оптимальным режимом разрушения, при заданных $D_{ш}$ и d_c находят оптимальный вариант шнекового органа погрузки.

Исходя из погрузочной способности шнека, можно определить максимально возможную скорость подачи $v_{п\max}$. Для этого приравниваем производительность по разрушению с производительностью шнека [7]. Тогда:

$$v_{п\max} = \frac{\pi\phi K_{ц} h_b n (D_{ш}^2 - d_c^2)}{4b_3 D_{ш} K_p}, \quad (34)$$

где b_3 – ширина захвата шнека, м.

Полученные значения $v_{п\max}$ отличаются от принятой максимальной скорости подачи ($v_{п} = 8$ м/мин) и являются отражением скоростей, применяемых на практике. Это позволяет допускать, что сопротивление погрузке также является причиной снижения скорости подачи системой автоматического регулирования выемочной машины, в особенности, когда используются погрузочные щитки.

Параллельно, и это следует особенно подчеркнуть, принятие низкого коэффициента k_n обеспечивает получение процесса погрузки при минимальной рециркуляции добычи и ее измельчении, а также при минимальном сопротивлении погрузке. Увеличение этого коэффициента позволяет применять большие скорости подачи, однако следует считаться с излишним переизмельчением добычи и увеличением сопротивления погрузке.

Таким образом, разработанная методика, горно-геологические условия месторождений и технические возможности производителей позволяют определить границы изменчивости параметров шнекового исполнительного органа.

Заключение. Чтобы продольная скорость в шнековом исполнительном органе увеличивалась вдоль направления движения добычи в сторону конвейера, можно ввести изменяющийся угол подъема винтовой линии лопастей. Кроме того, эта скорость зависит от скорости вращения органа, шага шнека и коэффициента трения сильвинита по шнеку.

Основное условие правильного протекания процесса погрузки шнековым исполнительным органом: внутренний объем органа должен быть больше количества добычи, образующейся во время выемки. В то же время, поток добычи, выходящий из органа на конвейер, должен иметь такой объем, чтобы свободное пространство обеспечивало его свободное протекание, при этом добыча увеличивается в объеме после отделения от пласта, что характеризует коэффициент разрыхления добычи k_p , а также факт частичной погрузки добычи без участия исполнительного органа (коэффициент k_q).

Список использованных источников

1. Мартынов, В.Д. Расчет глиноперерабатывающего оборудования: учебное пособие / В.Д. Мартынов, А.В. Туренко. – М.: МИСИ, 1979. – 64 с.
2. Машины и оборудование для шахт и рудников: справочник / С.Х. Клорикьян [и др.]. – М.: МГГУ, 1994. – 471 с.
3. Bottcher, S. Eine allgemeine Analyse der Aufwärts forderung eines Einzelkorpers in Schneckenforderern beliebiger Neigung / S. Bottcher // VDJ-Zeitschrift. – 1963. – № 14. – P. 18.

4. Горленко, В.В. Определение возможности применения установки БУГ для шнековой закладки породы в скважины / В.В. Горленко // Сб. трудов ДонУГИ, 1975. – № 58.
5. Сагалаев, Г.В. К вопросу о производительности экструзионных машин / Г.В. Сагалаев // Пластические массы. – 1962. – № 7. – С. 50-58.
6. Горные машины и оборудование. Машины и оборудование подземных горных работ: учебно-методический комплекс / Сост. Д.А. Юнгмейстер. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. – 117 с.
7. Очистные комбайны: справочник / Под общей ред. В.И. Морозова. – М.: МГГУ, 2006. – 650 с.

Информация об авторе

Гридюшко Дмитрий Валерьевич – магистр технических наук, аспирант Белорусского национального технического университета, начальник Опытного-экспериментального цеха, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Коднянко Елена Викторовна – аспирант УО «Белорусский государственный университет транспорта», инженер по научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Коднянко Максим Юрьевич – магистр технических наук, аспирант УО «Белорусский государственный университет транспорта», инженер-технолог, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Information about the authors

Hrydziushka Dzmitry Valerievich – Master of Engineering Sciences, Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, Head of the experimental workshop, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Kodnianka Alena Victorovna – Post-graduate Student, Belarusian State University of Transport, Engineer for scientific and technical information, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Kodnianka Maxim Yurievich – Master of Engineering Sciences, Post-graduate Student, Belarusian State University of Transport, Process engineer, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Поступила в редакцию 21.11.2019 г.

УДК 621.313-192:006.063(476)

Приходько И.В., Бойков К.Р., Кошко А.Н.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
В РАМКАХ ПРОВЕДЕНИЯ СЕРТИФИКАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с деятельностью испытательных лабораторий и испытательных центров в направлении выявления несоответствий в работе тягового оборудования на первичных этапах производства и запуска, с целью проверки надежной и безопасной работы электрооборудования тягового подвижного состава. Представлены и рассмотрены некоторые методы контроля и нормативные значения сертификационных показателей, а также оценено качество работы электрических машин в рамках проведения инспекционного контроля.

Ключевые слова: сертификационные испытания, электрическая машина, тяговый генератор, виброскорость, биения, сопротивление изоляции, электрическая прочность.

Prihodzko I.V., Boikov K.R., Koshko A.N.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF CERTIFICATION INDICATORS
IN TERMS OF RELIABILITY AND SAFETY OF ELECTRIC MACHINES**

Abstract. The article deals with the issues related to the activities of test laboratories and test centers in terms of identifying inconsistencies in the work of traction equipment at the initial stages of production and launch, in order to check the reliable and safe operation of electric equipment of traction rolling stock. Some methods of control and normative values of certification indicators are presented and considered, as well as the quality of electric machines in the framework of inspection control is evaluated.

Keywords: certification tests, electric machine, traction generator, vibration speed, runout, insulation resistance, electrical strength.

Введение. Тяговый железнодорожный подвижной состав с каждым годом становится все более сложным и многофункциональным. В настоящее время использование полупроводниковых приборов в системах тягового привода уже не является редкостью. Широко внедряются системы микропроцессорного управления, автоматического ведения и контроля. На электропоездах ранних серий с электромеханическим управлением почти все режимы работы задавала и контролировала локомотивная бригада. Ее основной задачей являлось обеспечение безопасности движения, перевозки грузов и пассажиров. При этом у машиниста был широкий спектр выбора параметров разгона, времени выбега и торможения. Опытные машинисты были способны не только безопасно вести поезд, но и эффективно управлять энергопотреблением. Современный тяговый подвижной состав оснащен упрощенными в управлении контроллерами и сложными системами автоведения и контроля безопасности. Так современные системы автоматического ведения поезда способны поддерживать заданные параметры движения, осуществлять запланированные остановки на протяжении всего заданного маршрута. Комплексные локомотивные устройства безопасности способны не только принимать сигнальную информацию от путевых устройств автоматической локомотивной сигнала-

лизации непрерывного действия и отображать ее на индикаторах и мониторах машиниста, но и следить за состоянием здоровья локомотивной бригады. Совместно же эти системы способны осуществлять дистанционное управление или даже вести поездку самостоятельно.

С внедрением высокоинтеллектуальных систем нельзя однозначно утверждать, что труд человека становится легче или не нужен вовсе, а системы автоведения привели к экономии топлива и электроэнергии. Возможно, управлять поездом сейчас стало проще, но современные системы требуют нового подхода как в эксплуатации, так и при ремонте и наладке. Сейчас многие вопросы энергоэффективности и безопасности сместились в сторону изготовителя, наладчиков и ремонтных бригад. Поэтому от работы испытательных центров и лабораторий, которые видят новый подвижной состав в числе первых, зависит развитие всей железнодорожной отрасли в целом.

На этапе приемочных испытаний в процессе первичной наладки или при сертификационных испытаниях тягового оборудования при комплексном подходе можно оптимально выбрать режимы его работы, оценить влияние климатических параметров и многих других факторов. При решении этих вопросов необходимо участие специалистов, имеющих знания и практический опыт в таких направлениях как: динамика подвижного состава, прочность и ресурс подвижного состава, тяга поездов, тормоза подвижного состава, системы тягового привода и управления, цифровые и информационные устройства, электромагнитная совместимость, экологическая безопасность.

На сегодняшний день на территории Таможенного союза почти все крупные испытательные, научно-исследовательские центры находятся на территории Российской Федерации и единичные центры – в Казахстане и Беларуси, что приводит к разрыву связи «наука – производство» и негативно сказывается на развитии железнодорожного транспорта и его инфраструктуры. Испытательный центр железнодорожного транспорта Белорусского государственного университета транспорта является единственным в своем роде на территории Республики Беларусь. Накопленный при испытаниях опыт способствует не только качественному проведению испытаний, но и при участии сотрудников центра в проектировании, первичных опытных испытаниях и наладке заблаговременно увидеть возможные недостатки. Уменьшить время и исключить незапланированные расходы на исправление допущенных ошибок и проведение повторных испытаний [1].

Сертификационные испытания тягового электрооборудования, в том числе тяговых электродвигателей и тяговых генераторов (рисунок 1), являются одной из важных и сложных задач при оценке качества работы тягового подвижного состава. В качестве объекта сертификационных испытаний рассмотрим генератор тяговый синхронный ГС501А. Это электрическая машина переменного тока, предназначенная для эксплуатации на тепловозах с электрической передачей переменного тока, и служит для преобразования механической энергии дизеля в электрическую. Основные характеристики тягового генератора приведены в таблице 1.



Рисунок 1. – Генератор тяговый синхронный ГС501А

Таблица 1. – Характеристики тягового генератора

Краткая техническая характеристика			
Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
2800	580/360	1000	6000

Сертификационные показатели. Сертифицируемые электрические машины испытываются по методам и требованиям ГОСТ 2582-2013 [2]. Спектр испытаний очень широк, и рассмотреть все пункты в рамках одной статьи не представляется возможным, поэтому рассмотрим подробно более узкий ряд показателей, проверяемых при инспекционном контроле. Одними из обязательных сертификационных показателей являются: измерение механической вибрации электрической машины при любой рабочей частоте вращения, оценка радиальных биений на рабочих частотах вращения контактных колец по длине окружности, проверка электрической прочности изоляции, измерение сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса электрической машины и между обмотками, измерение температуры частей электрической машины и так далее.

Вибрация электрической машины в значительной степени зависит от способа ее эксплуатации, и поэтому необходимо проводить измерение вибрации в условиях, близких к действительным условиям ее размещения [3]. Тяговый генератор ГС501А относят к категории электрических машин без особых требований к вибрации (категория «А»). От этой категории зависят условия проведения испытаний и нормы контролируемой характеристики. Оценка величины вибрации испытываемой электрической машины производится методом жесткого крепления в соответствии с ГОСТ 60034-14-2014 [4]. Необходимо чтобы измерительное оборудование обеспечивало оценку вибрации на горизонтальном участке амплитудно-частотной характеристики в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. Значения вибрации (величина виброскорости) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях для ГС501А и величина предельного значения для соответствующего способа крепления электрической машины указаны в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты измерений виброскорости

Контролируемая характеристика (параметр)	Частота вращения, об/мин	Направление измерения	Значение параметра, мм/с	
			нормативное, не более	фактическое
Виброскорость на поверхности крышки подшипника генератора	1000	X	2,3	1,1
		Y		1,7
		Z		2,1

На электрических машинах могут быть предусмотрены места для установки вибропреобразователей. На корпусе тягового генератора ГС501А специальных мест для установки акселерометров не предусмотрено, в таком случае уровень вибраций электрической машины при испытаниях измеряли на подшипниковом щите. При диагностировании большинства механических дефектов величину абсолютной вибрации рекомендуется измерять в вертикальном, горизонтально-поперечном и осевом направлениях [5]. В процессе испытаний оценку уровня виброскорости проводили при работе электрической машины в режиме холостого хода с установившейся частотой вращения в диапазоне от наименьшей до наибольшей.

В процессе испытания электрической машины проводится измерение температуры как ее активных частей, в первую очередь изолированных обмоток, так и неактивных – опор (подшипников и подпятников).

Измерение температуры опор (подшипников и подпятников) выполняется на их неподвижных частях (наружных обоймах подшипников качения) измерителями температуры – термопреобразователями контактного типа или встраиваемыми на время испытания, в обязательном порядке, если это указано в технических условиях, на конкретные виды электрических машин. В качестве таких термопреобразователей применяются главным образом термопары, как имеющие стандартную градуировку, например, хромель-алюмель или хромель-копель, так и нестандартные, например, медь-константан. Совместно с термопарами могут применяться любые устройства для измерения малых ЭДС, в том числе, автоматически действующие с линейной, точечной или цифровой записью.

Для опор качения точка измерения температуры должна отстоять от рабочей поверхности опоры не более чем на 10 мм. При отсутствии возможности доступа к наружной обойме подшипников качения измерение температуры допускается определять также по результатам измерения на крышке подшипника [6]. Измерение температуры поверхности крышки подшипникового узла производилось при помощи термогигрометра TESTO 400, в комплект которого входит контактный зонд. Усредненный результат данного показателя составил 32 °С при норме 100 °С. Сравнительные испытания температуры поверхности, проведенные с помощью тепловизора TESTO 881, и данные, полученные в результате тепловизионной съемки (рисунок 2), сопоставимы с результатами контактного метода, однако, отличаются значительной наглядностью.

Для измерения местной температуры во вращающихся частях машины (температура контактных колец) применяются стандартизованные термоэлектрические преобразователи, прошедшие метрологическую аттестацию. Помимо того, допускается применять бесконтактный метод измерения температуры. Как и любой метод, он имеет как ряд достоинств, так и недостатков. К основным достоинствам бесконтактного метода, как уже отмечалось, помимо наглядности (рисунок 3), можно отнести получение одновременно большого массива данных температурной картины объекта, который можно анализировать в зависимости от поставленных задач. Еще одно значимое достоинство метода – это отсутствие контакта с вращающимися и находящимися под высоким напряжением частями электрических машин.

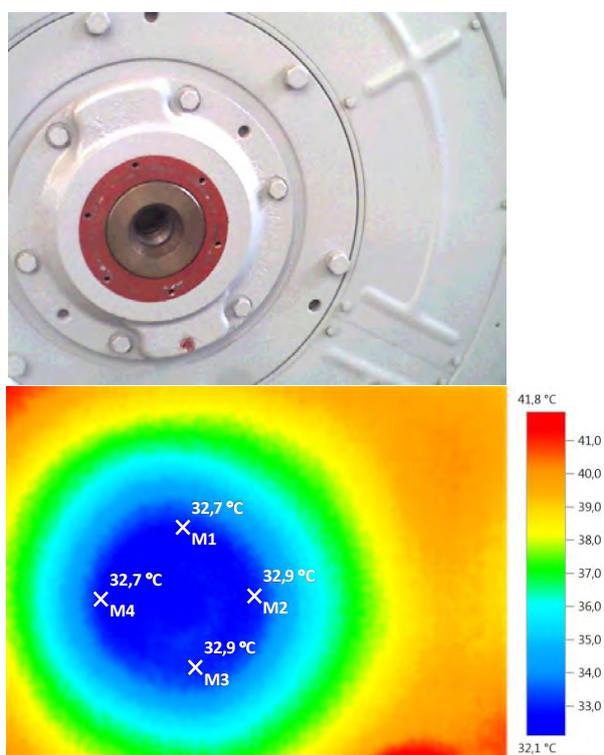


Рисунок 2. – Тепловизионная съемка поверхности крышки подшипникового узла

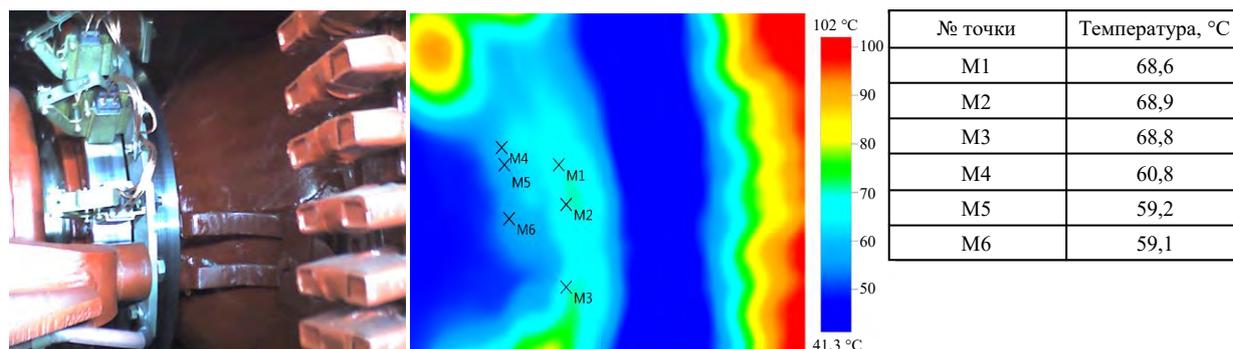


Рисунок 3. – Тепловизионная съемка контактных колец

К недостаткам такого метода можно отнести появление дополнительной погрешности при передаче измерительного сигнала от вращающихся деталей. Для испытательного оборудования она не должна превышать 2 °C.

Величина нормативного значения допустимого превышения зависит от класса нагревостойкости кольца, который должен быть прописан в технической документации. По ТУ У 31.1-00213121-156:2007 класс нагревостойкости контактных колец – F, а согласно таблице 5.1 [2] допускаемые значения превышения их температуры над температурой окружающего воздуха должны быть не более 120 °C. Результаты нагрева контактных колец по отношению к температуре окружающего воздуха приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Определение допустимых превышений температуры контактных колец над температурой окружающего воздуха

Наименование части аппарата	Температура окружающего воздуха, °C	Среднее превышение температуры нагрева контактных колец, °C	
		нормативное, не более	фактическое
Кольцо № 1	12	120	56
Кольцо № 2		120	48

Одним из важных показателей нормальной работы щеточно-коллекторного узла, от которого в значительной степени зависит износ контактных колец, являются *биения контактных колец*. Проверку показателя следует производить до и после испытания на повышенную частоту вращения [7]. Измерение биения контактных колец по окружности производят в статическом состоянии непосредственно на собранной машине индикатором часового типа (в конкретном случае ИЧ10), дающим необходимую точность и имеющим плоскую контактную головку. При измерении индикатор укрепляют неподвижно на стойке рядом с контактными кольцами, головку прибора подводят к поверхности кольца в радиальном направлении (рисунок 4). С поворотом ротора происходит поворот кольца, и при наличии на его поверхности отклонений от заданной кривизны измеренное из-



Рисунок 4. – Измерение биения контактных колец

менение передается посредством головки измерительного прибора на шток, а их величина определяется через отклонение стрелочного указателя по циферблату. Результаты испытаний по данному сертификационному показателю сведены в таблицу 4.

Таблица 4. – Результаты измерения биения контактных колец генератора

Контролируемая характеристика (параметр)	Дополнительные сведения	Значение параметра, мм	
		нормативное, не более	фактическое
биения в холодном состоянии	кольцо 1	–	0,03
	кольцо 2		0,02
биения в нагретом состоянии	кольцо 1	0,04	0,02
	кольцо 2		0,01
разница между биениями в холодном и нагретом состояниях	кольцо 1	0,02	0,01
	кольцо 2		0,01

Измерение радиальных биений контактных колец производится как на холодной электрической машине, так и машине в нагретом состоянии, хотя нормируется величина биений только в нагретом состоянии. Однако, нормативное значение установлено для разницы между биениями в холодном и нагретом состояниях электрической машины. Это обусловлено необходимостью проверки равномерности плоскости окружности контактных колец после воздействия температуры, которая может быть нарушена вследствие неравномерного нагрева.

Одним из показателей качества используемых изоляционных материалов и сборки электрической машины является испытание *изоляции обмоток на электрическую прочность* и измерение *сопротивления изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками*. Изоляция обмоток электрических машин относительно корпуса и между обмотками должна выдерживать в течение 1 мин действующее значение испытательного синусоидального напряжения $U_{исп}$ частотой 50 Гц, рассчитанное по формуле (1):

$$U_{исп} = 2 \cdot U_{л} + 1000, \quad (1)$$

где $U_{л}$ – линейное напряжение.

Согласно требованиям ГОСТ 2582-2013 [2], величина испытательного напряжения должна быть не менее 1500 В. Значение рассчитанного испытательного напряжения округляется с кратностью 250 В до ближайшего значения в большую сторону.

В нашем случае для расчета величины испытательного напряжения для проверки обмоток статора тягового генератора ГС501А необходимо знать линейное напряжение. Согласно технической документации оно составляет 580 В. Тогда с использованием вышеприведенной формулы (1) получим:

$$U_{исп} = 2 \cdot 580 + 1000 = 2160 \text{ В},$$

а с учетом необходимости округления с заданной кратностью в большую сторону величина напряжения составила 2250 В.

Расчет величины испытательного напряжения для проверки обмоток ротора генератора выглядит несколько сложнее, т.к. необходимо рассчитать величину линейного напряжения $U_{л}$. Для этого нужно произвести измерение силы тока I , протекающего по обмотке, а также величины сопротивления обмотки R_{max} и обязательно в

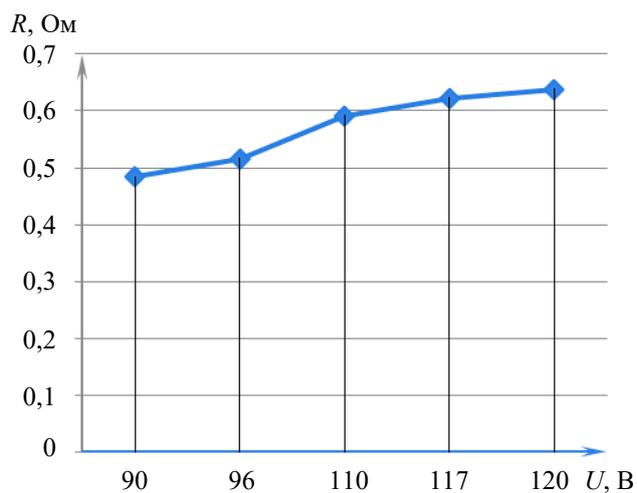


Рисунок 5. – Зависимость падения напряжения от величины сопротивления при росте температуры обмотки

нагретом состоянии, в силу того, что при нагревании сопротивление возрастает, а, следовательно, увеличивается падение напряжение (рисунок 5).

$$U_{\text{л}} = IR_{\text{max}}. \quad (2)$$

Зная величины измеренных параметров и используя закон Ома (2), можем рассчитать искомую величину $U_{\text{л}}$:

$$U_{\text{л}} = 195 \cdot 0,613 = 120 \text{ В.}$$

С учетом определенного линейного напряжения 120 В и согласно формуле (1), расчет величины испытательного напряжения будет иметь вид:

$$U_{\text{исп}} = 2 \cdot 120 + 1000 = 1240 \text{ В.}$$

После проведения необходимого округления величина напряжения составила 1250 В. Как уже описывалось выше, напряжение испытания согласно ГОСТ 2582-2013 должно быть не менее 1500 В. В следствие чего принимаем испытательное напряжение равным 1500 В.

Изоляция между смежными витками обмоток тяговых генераторов должна в течение 5 минут выдерживать испытание повышенным напряжением на 12 % сверх наибольшего номинального на выводах электрической машины при ее работе на холостом ходу. В таком случае величина испытательного напряжения составит:

$$U_{\text{исп}} = 580 + 0,12 \cdot 580 = 650 \text{ В.}$$

Электрическая машина считается прошедшей испытания в том случае, если в течение указанного времени испытания не произошло пробоя изоляции, и электрическая машина сохранила свою работоспособность.

Сопротивление изоляции обмоток нагретой электрической машины относительно ее корпуса и сопротивление изоляции между обмотками, измеренное на нагретой машине после проведения тепловых испытаний, в зависимости от номинального напряжения относительно заземленных частей должно быть не менее 2,5 МОм. Обязательным условием проведения измерения сопротивления изоляции является необходимость проведения испытаний после ее проверки на электрическую прочность. В холодном состоянии сопротивление изоляции обмоток электрических машин должно быть не менее 20 МОм, если иное значение не задано заказчиком. Полученные результаты измерения сопротивления изоляции генератора приведены в таблице 5.

Значение величины измеренного сопротивления изоляции должно быть не менее номинального для данной категории электрической машины.

Выводы. Основной целью испытательных лабораторий и центров является проведение испытаний для подтверждения соответствия объекта испытания требованиям безопасности посредством применения и использования стандартизованных методик. Конечно, испытательные центры работают в рамках требований аккредитующих организаций и по программам органов по сертификации, но при разработке стандартов и программ нельзя предусмотреть все возможные варианты событий, к которым могут привести новые конструкторские решения [8].

Таблица 5. – Результаты проверки сопротивления изоляции

Наименование обмоток генератора	Сопротивление изоляции, МОм	
	нормативное, не менее	фактическое
проверка в холодном состоянии		
обмотка ротора – корпус	20	521
первое соединение обмоток в форме звезды – корпус		783
второе соединение обмоток в форме звезды – корпус		747
первое соединение звездой – второе соединение звездой		564
проверка в горячем состоянии		
обмотка ротора – корпус	2,5	209
первое соединение обмоток в форме звезды – корпус		514
второе соединение обмоток в форме звезды – корпус		658
первое соединение звездой – второе соединение звездой		486

Поэтому очень актуальным является комплексный подход к проведению испытаний и выявлению возможных несоответствий в работе тягового электрооборудования. Важно чтобы испытания, от которых зависит надежность и безопасность работы оборудования, были проведены не только в соответствии с методами международных или национальных стандартов, но и реализованы с использованием передового испытательного и измерительного оборудования, которое имеет не только высокую точность, но и большую степень функциональности.

Список использованных источников

1. Бойков, К.Р. О важности работы испытательных организаций. Комплексный подход / К.Р. Бойков, И.В. Приходько // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28-29 нояб. 2019 г. / БелГУТ. – Гомель, 2019. – С. 110-111.
2. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: ГОСТ 2582-2013. – Введ. 01.01.15. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
3. Приходько, И.В. Влияние вибрации на надежность и безопасность подвижного состава / И.В. Приходько, С.А. Коринчук // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28-29 нояб. 2019 г. / БелГУТ. – Гомель, 2019. – С. 187-189.
4. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций: ГОСТ ИЕС 60034-14-2014. – Введ. 01.05.2014. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2015. – 16 с.
5. Приходько, И.В. Влияние вибрации на надежность и безопасность электрических машин / И.В. Приходько // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 74-80.

6. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие методы испытаний: ГОСТ 11828-86. – Введ. 01.07.87. – Минск: Государственный стандарт Республики Беларусь: Госстандарт, 2011. – 33 с.

7. Машины электрические вращающиеся коллекторные. Методы испытаний: ГОСТ 10159-79. – Введ. 01.07.80. – Минск: Государственный стандарт Республики Беларусь: Госстандарт, 2018. – 12 с.

8. Бойков, К.Р. Испытание энергетических систем подвижного состава. Проблемы и возможные решения / К.Р. Бойков // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 28-29 нояб. 2019 г. / БелГУТ. – Гомель, 2019. – С. 109-110.

Информация об авторах

Приходько Иван Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Электрические и электронные системы» ИЦ ЖТ БелГУТа, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Бойков Камил Равильевич – заведующий лабораторией «Электрические и электронные системы» ИЦ ЖТ БелГУТа, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Кошко Алексей Николаевич – магистрант, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Information about the authors

Prihodzko Ivan Vasilyevich – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher of the “Electrical and electronic circuits” Laboratory of the Test Center, Belarusian State University of Transport, (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Boikov Kamil Ravilevich – Head of the “Electrical and electronic circuits” Laboratory of the Test Center, Belarusian State University of Transport, (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Koshko Alexey Nikolaevich – undergraduate, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 16.01.2020 г.

УДК 621.926.4

Вайтехович П.Е.*УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***САМОБАЛАНСИРОВКА РОТОРА
БЫСТРОХОДНЫХ УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ**

Аннотация. В статье проведен анализ причин разбалансировки ротора быстроходных ударных мельниц и последствий этого явления. Приведено обоснование использования способа самобалансировки ротора, основанного на текучести жидких и сыпучих сред. Дано теоретическое подтверждение возможности самобалансировки с помощью текучего материала, в качестве которого предлагается применять мелкие металлические шарики.

Ключевые слова: ударный измельчитель, ротор, центробежная сила, жидкость, давление, самобалансировка, сыпучая среда, мелкие шарики.

Vaitekhovich P.E.*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***ROTOR SELF-BALANCING OF QUICK-MILLING IMPACT GRINDERS**

Abstract. The article provides an analysis of the reasons for the imbalance of the rotor of high-speed impact mills and the consequences of this phenomenon. The rationale for the use of the method of self-balancing of the rotor, based on the fluidity of liquid and granular media. Theoretical confirmation of the possibility of self-balancing with the help of a fluid material, which is proposed to use small metal balls, is given.

Keywords: impact grinder, rotor, centrifugal force, liquid, pressure, self-balancing, granular medium, small balls.

Введение. Ударные измельчающие агрегаты широко используются во многих отраслях промышленности. Это помол сырьевых компонентов и клинкера в производстве цемента, измельчение стеклобоя, обогащение калийных руд. Ударные измельчители по сравнению с традиционными барабанными мельницами характеризуются меньшими удельными энергозатратами на проведение процесса помола [1]. Одновременно с этим, общая интенсивность износа рабочих органов в ударных измельчителях меньше, чем в барабанных. Однако даже самый большой износ мелющих тел (шаров, стержней), футеровки в барабанных мельницах не нарушает принципиально работу агрегата как механической системы, хоть и влияет на эффективность помола, производительность, удельные энергозатраты. В быстроходных же мельницах ударного действия даже на порядок меньший износ, неравномерный износ рабочих органов приводит к разбалансировке ротора и, как следствие, к вибрации, биениям. В результате разбиваются подшипники, изнашивается вал, элементы привода. Предотвращение этих нежелательных явлений требует частой остановки измельчителя для замены ударных элементов и последующей балансировки ротора. В зависимости от измельчаемого материала ресурс безостановочной работы ударных мельниц составляет в среднем несколько сотен часов, а в отдельных случаях даже менее ста часов. Увеличение этого ресурса в условиях реального производства является весьма актуальной задачей.

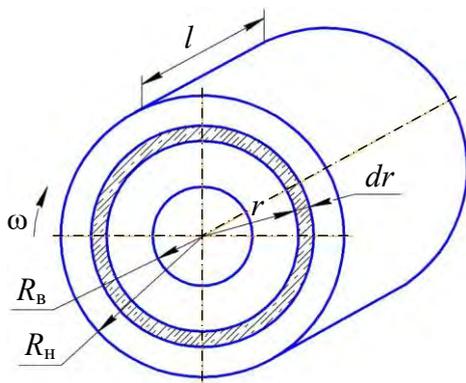
Основная часть. Как отмечается в теории решения изобретательских задач [2], идеальный конечный результат достигается тогда, когда объект «сам» преодолевает

имеющееся в нем противоречие, проблему. Это ключевое слово дало импульс на поиск путей решения проблемы в направлении самобалансировки. Она должна заключаться в том, что на вращающемся роторе необходимо наличие какого-то элемента, скорее всего подвижного, который компенсирует разбалансировку.

Анализ работы различного технологического оборудования в смежных отраслях промышленности показал, что существуют и успешно работают такие агрегаты. Это, прежде всего, центрифуги для разделения суспензий [3] в химической и пищевой промышленности. Подвижным элементом, обеспечивающим самобалансировку, в них является жидкость – жидкая фаза обрабатываемых суспензий.

Рассмотрим теоретические предпосылки такой самобалансировки с использованием расчетной схемы, рисунок 1.

Во вращающийся ротор центрифуги подается жидкая смесь. Под воздействием инерционной центробежной силы она равномерно распределяется по его стенкам, образуя своеобразную трубку толщиной $\delta = R_n - R_b$. Для того, чтобы определить центробежную силу, удерживающую слой смеси на стенках, выделим по ее толщине элементарный участок (трубку) толщиной dr и длиной l .



ω – скорость вращения; r – внутренний радиус элементарной трубки; R_b, R_n – внутренний и наружный радиусы жидкости

Рисунок 1. – Расчетная схема

Центробежная сила, действующая на него:

$$dF_{\text{ц}} = dm \cdot \omega^2 \cdot r. \quad (1)$$

Масса dm элементарной трубки:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot l, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкой смеси;

dV – объем элементарной трубки.

Центробежная сила, которая возникает при вращении всего слоя толщиной δ :

$$F_{\text{ц}} = \int_{R_b}^{R_n} dF_{\text{ц}} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l \cdot \omega^2 \int_{R_b}^{R_n} r^2 dr. \quad (3)$$

После интегрирования и подстановки пределов получим:

$$F_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l \cdot \omega^2 \cdot (R_n^3 - R_b^3)}{3}. \quad (4)$$

Давление, которое оказывает смесь на стенки ротора:

$$p = \frac{F_{\text{ц}}}{S} = \frac{F_{\text{ц}}}{2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot l}, \quad (5)$$

где S – площадь боковой поверхности ротора.

С учетом (4) формула для определения давления примет вид:

$$p = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot (R_n^3 - R_b^3)}{3 \cdot R_n}. \quad (6)$$

По формуле (6) можно определить давление в любой точке по толщине слоя δ . Для этого вместо R_n надо подставить ее текущий радиус.

Конструкционно самобалансирующий элемент должен быть выполнен по образцу центрифуги в виде цилиндрической камеры, а лучше двух камер, заполненных жидкостью и прикрепленных по торцам ротора, например, молотковой мельницы. Тогда на жидкость в камере будет действовать две центробежные силы: от массы жидкости $F_{1ц}$ и массы молотков $F_{2ц}$. При хорошо сбалансированном роторе суммарная сила инерции равномерно распределяется по окружности ротора. Также равномерно в виде слоя одинаковой толщины распределяется и жидкость в дополнительных камерах. Давление в любой точке по окружности этого слоя будет одинаковым.

Центробежная сила, действующая на молоток:

$$F_{2ц} = m_M \cdot \omega^2 \cdot R_M, \quad (7)$$

где m_M – масса молотка;

R_M – радиус от оси вращения до его центра тяжести.

Общее давление на жидкость при этом:

$$p = \frac{F_{1ц} + F_{2ц}}{S}. \quad (8)$$

Схема действия этих сил показана на рисунке 2.

При хорошо сбалансированном роторе силы $F_{2ц}$ взаимно уравновешиваются. Жидкость в самобалансирующей камере под воздействием силы $F_{1ц}$ равномерно распределяется по ее стенкам – $\delta = \text{const}$. Давление во всех точках слоя жидкости тоже одинаковое.

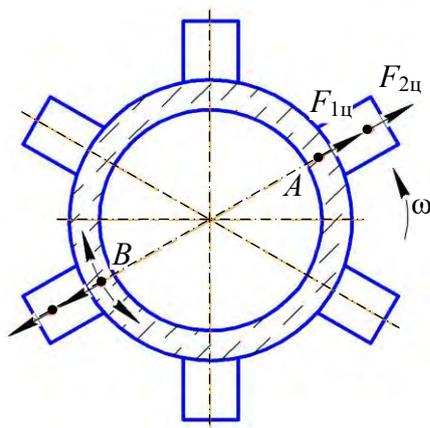


Рисунок 2. – Схема ротора молотковой мельницы с самобалансирующей камерой

В процессе эксплуатации ударные элементы изнашиваются неодинаково и, например, масса молотка, закрепленного в точке A , стала меньше, чем в точке B ($m_A < m_B$). В этом случае и центробежная сила $F_{2ц}$ в этой точке уменьшится пропорционально массе. Естественно, что и давление жидкости в соответствующем сечении самобалансирующей камеры станет меньше. А, как известно из гидродинамики, жидкость всегда движется из точки B с большим давлением к точке A с меньшим. Это движение продолжается до тех пор, пока давление по всему слою жидкости в камере не выровняется. И так жидкость реагирует на любое изменение центробежных сил $F_{2ц}$, действующих на ударные элементы (молотки), и способствует предотвращению такого нежелательного явления, как разбалансировка.

Открытым остается вопрос о жидкости, которую можно использовать для самобалансировки. Вода для этой цели малопригодна, поскольку ее плотность почти в восемь раз меньше плотности стали, из которой выполнен ротор измельчителя. Чтобы размеры самобалансирующей камеры были не очень большими, плотность жидкости должна быть, по возможности, больше плотности конструкционного материала.

Первым, что появляется в фокусе мысли, это жидкие металлы, например, ртуть. Но это экологически опасное вещество, и применять его в условиях производства недопустимо. С другой стороны, функции жидкости может выполнить сыпучая среда. Более того, многочисленными исследованиями [4] доказана идентичность расчетных уравнений и законов их движения.

Наиболее доступной сыпучей средой можно считать кварцевый песок. Однако из-за меньшей плотности по сравнению с металлами и высокой абразивности он не очень подходит для самобалансировки. Более приемлемым материалом для этих целей могут стать мелкие металлические шарики, например, свинцовая дробь. Указанный материал доступен, малоабразивен. И что самое главное, атомная масса свинца почти в четыре раза выше, чем железа. Конечно, насыпная масса будет немного меньше, но это не окажет существенного влияния на положительные качества сыпучей среды в виде мелких шариков.

Выводы. Таким образом, в данной статье приведено обоснование использования одного из способов самобалансировки рабочих органов быстроходных ударных измельчителей. Способ основан на текучести и самобалансирующих свойствах жидкой среды. Причем в качестве такой среды предложено применять аналог жидкости – сыпучую среду в виде мелких металлических шариков. Конечно, такая самобалансировка не продлит срок службы ударных элементов до бесконечности, но увеличен он будет существенно.

Список использованных источников

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил: монография / П.Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Альтшуллер, Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г.С. Альтшуллер. – Новосибирск: Наука, 1991. – 225 с.
3. Шкоропад, Д.Е. Центрифуги и сепараторы / Д.Е. Шкоропад, О.П. Новиков. – М.: Химия, 1987. – 384 с.
4. Генералов, М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии / М.Б. Генералов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.

Информация об авторе

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: vpe51@mail.ru.

Information about the author

Vaitekhovich Piotr – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: vpe51@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

УДК 622.242.6-762:621.891(045)(476)

Богданович П.Н.¹, Коднянко М.Ю.², Брундуков А.С.¹, Стратанович В.А.¹¹УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь²ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ УПЛОТНЕНИЙ БУРОВЫХ НАСОСОВ ИЗ ПОЛИУРЕТАНА, РАБОТАЮЩИХ В ВОДНОЙ СРЕДЕ С АБРАЗИВОМ

Аннотация. Приводятся результаты исследований изнашивания полиуретана при трении по контртелу из стали в жидкой рабочей среде, содержащей абразивные частицы. Обсуждаются закономерности влияния нагрузки и содержания абразива в водной среде на линейную интенсивность изнашивания полиуретана. Рассмотрены виды изнашивания полиуретана при различных режимах нагружения. Показано, что нанесение покрытия из политетрафторэтилена на рабочую поверхность манжеты значительно повышает ее износостойкость в диапазоне нагрузок 10-25 Н. При более высоких нагрузках покрытие быстро разрушается, и его применение становится малоэффективным.

Ключевые слова: абразив, абразивное изнашивание, адгезионное взаимодействие, износостойкость, линейная интенсивность изнашивания, полиуретан, рабочая среда, усталостное изнашивание, эластомер.

Bogdanovich P.N.¹, Kodnianka M.Yu.², Brundukov A.S.¹, Stratanovich V.A.¹¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus²JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus

WEAR RESISTANCE OF DRILL PUMP SEALS MADE OF POLYURETHANE WORKING IN AQUEOUS MEDIUM WITH ABRASIVE

Abstract. The results of studies of the wear of polyurethane during friction on a counterbody made of steel in an aqueous working medium containing abrasive particles are presented. The laws of the influence of the load and the abrasive content in the aqueous medium on the linear wear rate of the polyurethane are discussed. The types of polyurethane wear under various loading conditions are considered. It is shown that the coating of polytetrafluoroethylene on the working surface of the cuff significantly increases its wear resistance in the load range of 10-25 N. At higher loads, the coating breaks down easily and its use becomes ineffective.

Keywords: abrasive, abrasive wear, adhesive interaction, wear resistance, linear wear intensity, polyurethane, working medium, fatigue wear, elastomer.

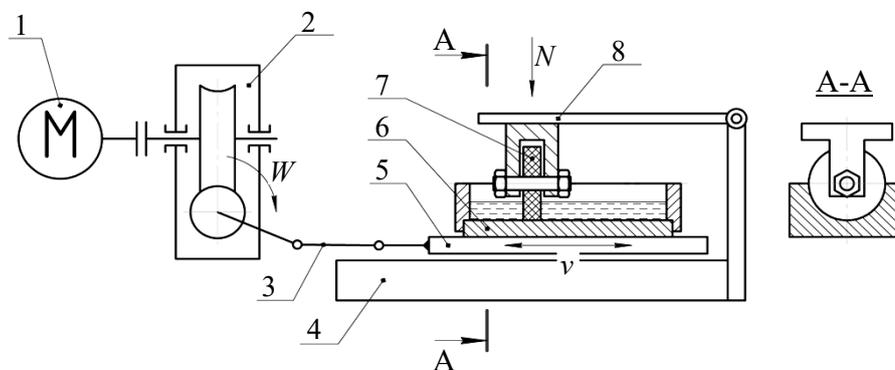
Введение. Одним из важнейших узлов буровой установки для добычи нефти и газа является буровой насос. Он служит для осуществления циркуляции бурового раствора в скважине, что позволяет сохранять породу в виде взвеси, освобождать забой и скважину от шлама, а также охлаждать долото [1]. Во время работы насоса в полость цилиндра попадает буровой раствор на нефтяной или водной основе, плотность которого в среднем составляет 1100-1300 кг/м³. Раствор имеет большую вязкость, в его состав могут входить абразивные частицы, глина, утяжеляющие добавки, химические реагенты и другие компоненты. Общее содержание твердых частиц в утяжеленном буровом растворе может достигать до 40 % объема [1]. В таких условиях наиболее интенсивно

изнашиваемой деталью насоса является манжета, устанавливаемая на поршень в цилиндровой группе.

На данный момент манжеты изготавливают из резины марки ИРП-1297 ТУ 26-20-1088-88. Эта смесь обладает высокой износостойкостью, повышенной твердостью (65-95 ShA) и маслостойкостью, способна работать в среде воды и воздуха при температурах от минус 20 до плюс 100 °С. Однако, даже при таких характеристиках срок службы резиновых манжет составляет 240-280 часов. Замена изношенных манжет сопряжена с необходимостью остановки всего технологического процесса бурения и приводит к существенным убыткам. Поэтому поиск новых износостойких материалов и разработка методов их объемного и поверхностного модифицирования представляют собой актуальное направление горного машиностроения. Перспективными в этом плане являются полиуретаны, обладающие высокой стойкостью к динамическому воздействию твердых частиц.

Цель работы: выявить закономерности изнашивания полиуретана при трении по контртелу из стали в жидкой рабочей среде, содержащей абразивные частицы.

Методика испытаний. В качестве материала для исследования был выбран полиуретан твердостью 80 ShA, как наиболее схожий по механическим характеристикам с резиной марки ИРП-1297, применяемой для изготовления манжет буровых насосов. Испытания проводились по схеме контакта «наружная цилиндрическая поверхность полиуретановой манжеты – внутренняя поверхность стального полуцилиндра» (рисунок 1). Частота n возвратно-поступательного движения манжеты по контртелу составляла 40 циклов в минуту, что соответствовало скорости скольжения v в серединной части пути трения 0,22 м/с. Нормальная нагрузка N изменялась в интервале 10 ÷ 30 Н. Схема установки, моделирующей работу манжеты в буровом насосе, представлена на рисунке 1.



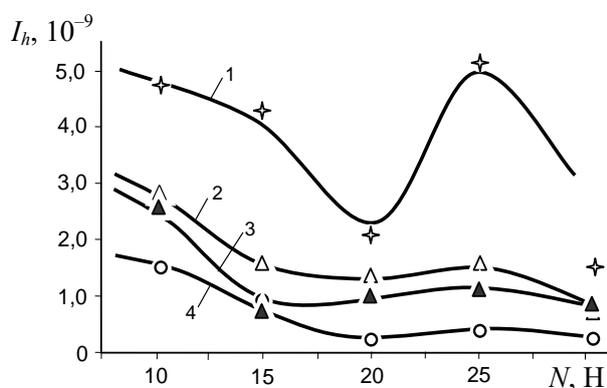
1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – кривошипно-шатунный механизм;
4 – станина с направляющими; 5 – салазки; 6 – контртело; 7 – образец;
8 – нагружающий механизм

Рисунок 1. – Схема установки для проведения испытаний

Вращение от вала электродвигателя 1 передается через червячный редуктор 2 на кривошипно-шатунный механизм 3, который превращает вращательное движение выходного вала редуктора в возвратно-поступательное движение салазок 5 с закрепленным на них контртелом 6 по направляющим станины 4. На станине жестко закреплен нагружающий механизм 8 с установленным в нем образцом 7. Таким образом, при включении электродвигателя совершается возвратно-поступательное движение образца 7 по контртелу 6. Контртело 6 представляет собой плиту, изготовленную из стали 18ХГТ, с пазом в виде полуцилиндра Ø40 мм, закрытым с торцов крышками. Паз

контртела цементирован на глубину 2 мм, закален до 55...62 HRC и имеет шероховатость поверхности трения $R_a = 0,8$ мкм. В паз заливается рабочая среда. Основой бурового раствора является вода, поэтому в качестве рабочей среды была выбрана вода с содержанием абразивных частиц 1 %; 5 %; 10 % и 20 %. Образец 7 представляет собой полиуретановое кольцо толщиной $s = 10$ мм и $\varnothing 40$ мм с отверстием $\varnothing 20$ мм для закрепления в нагружающем механизме 8. Номинальная площадь контакта образца с контртелом составляет $A = 6,28 \cdot 10^{-4}$ м². Линейная интенсивность изнашивания I_h полиуретана определялась по потере массы образца Δm . С целью повышения износостойкости один из образцов был поверхностно модифицирован путем нанесения покрытия из политетрафторэтилена методом электронно-лучевого диспергирования [2].

Обсуждение результатов исследований. Представленные на рисунке 2 результаты испытаний свидетельствуют о том, что независимо от содержания абразива C в рабочей среде увеличение нормальной нагрузки N от 10 до ~20 Н сопровождается



1 – $C = 1$ мас. %; 2 – $C = 5$ мас. %;
3 – $C = 10$ мас. %; 4 – $C = 20$ мас. %

Рисунок 2. – Зависимость линейной интенсивности изнашивания полиуретана от нагрузки при трении по стали в водной среде с различным содержанием C абразивных частиц

снижением линейной интенсивности изнашивания I_h . По-видимому, основной причиной такой зависимости является то, что с ростом нагрузки уменьшается зазор между трущимися деталями, и в зону контакта попадает меньшее количество абразивных частиц. Кроме того, в рассматриваемом случае реализуется преимущественно абразивное изнашивание полиуретана за счет проворачивания внедрившихся в поверхностный слой абразивных частиц, приводящего к микрорезанию. При повышении нагрузки абразивные частицы глубже внедряются в образец, что затрудняет их проворачивание, уменьшает вероятность микрорезания и снижает интенсивность изнашивания материала образца [3]. При этом должна увеличиваться I_h контртела.

Дальнейшее увеличение нагрузки (до 25 Н) приводит к повышению интенсивности изнашивания. Данный вид зависимости $I_h(N)$ объясняется конкурирующим действием следующих факторов: с одной стороны – дальнейшим уменьшением вероятности попадания абразивных частиц в зазор и возможности их проворачивания в материале образца, а с другой – переходом от абразивного изнашивания к адгезионному и усталостному видам. Так, при высоком значении N контактное давление становится достаточным для вытеснения рабочей среды из зоны трения. При этом в контакт начинают вступать поверхности трущихся тел, и между ними образуются фрикционные связи. Разрыв связей происходит как по границе раздела, так и по объему полиуретана, что обеспечивает его адгезионное изнашивание, при этом образуются скатки. Материал поверхностного слоя образца испытывает многократные деформации, что вызывает появление микротрещин, перпендикулярных вектору скорости, и протекание усталостного изнашивания. Накопленные при циклическом нагружении дефекты в поверхностном слое способствуют отделению частиц материала от образца и росту I_h [3, 4]. Сильно выраженный максимум интенсивности изнашивания при нагрузке 25 Н и малом содержании абразивных частиц в рабочей среде характерен только для кривой 1. Это

можно объяснить большой площадью контакта и высоким уровнем адгезионного взаимодействия между полиуретаном и стальным контртелом, сопровождающимися высокими контактными деформациями и интенсивным усталостным разрушением поверхности трения полиуретана.

При нагрузках, превышающих 25 Н, интенсивность изнашивания полиуретана вновь снижается. Причина в том, что давление в контакте абразивной частицы с полиуретаном становится настолько большим, что происходит шаржирование – микроразрыв поверхностного слоя полиуретана, внедрение и жесткое закрепление в нем частиц. При регистрации износа методом взвешивания закрепленный в материале образца абразив частично компенсирует потерю массы, вызванную изнашиванием, что занижает потерю массы образца и значения I_h . По мере роста нагрузки число внедряемых в изнашиваемый материал абразивных частиц увеличивается и приводит к более существенным ошибкам определения I_h . Сказанное подтверждается анализом поверхностей трения изношенных образцов, в которых были обнаружены внедренные абразивные частицы.

Анализ положения кривых 1-4 зависимости $I_h(N)$ на рисунке 2 указывает на то, что при увеличении концентрации абразивных частиц в рабочей среде I_h полиуретана снижается. Основная причина такой зависимости $I_h(C)$ в том, что доминирующим видом изнашивания полиуретана является не абразивное, а усталостное изнашивание, реализующееся посредством образования скаток. С увеличением содержания абразивных частиц большее их число попадает в зону трения, препятствуя непосредственному контакту образца с контртелом. При этом адгезионное взаимодействие и давление на пятна контакта уменьшается, приводя к снижению интенсивности усталостного разрушения поверхностного слоя полиуретана.

Подтверждением доминирующей роли усталостного изнашивания является снимок изношенной поверхности образца, представленный на рисунке 3. Видно, что поверхность полиуретана в результате изнашивания приобретает волнообразную форму, гребни и впадины располагаются перпендикулярно вектору скорости скольжения. Гребни волн на отдельных участках содержат продольные полосы – следы микрорезания полиуретана абразивными частицами, свидетельствующие о слабо проявляющемся абразивном изнашивании.

С целью повышения износостойкости на рабочей поверхности манжеты формировали тонкий слой политетрафторэтилена. Испытания поверхностно-модифицированных образцов проводились в водной среде, содержащей 10 мас. % абразивных частиц.

Представленные на рисунке 4 результаты сравнительных испытаний свидетельствуют о том, что нанесение покрытия из политетрафторэтилена на поверхность трения образца приводит к увеличению его износостойкости более чем в 2 раза. Это обусловлено снижением адгезионного взаимодействия материалов сопрягаемых деталей и, как следствие, уменьшением коэффициента трения и контактных деформаций полиуретана [5]. В результате снижается интенсивность усталостного разрушения поверхностного слоя. Покрытие из политетрафторэтилена снижает также сопротивление проскальзыва-

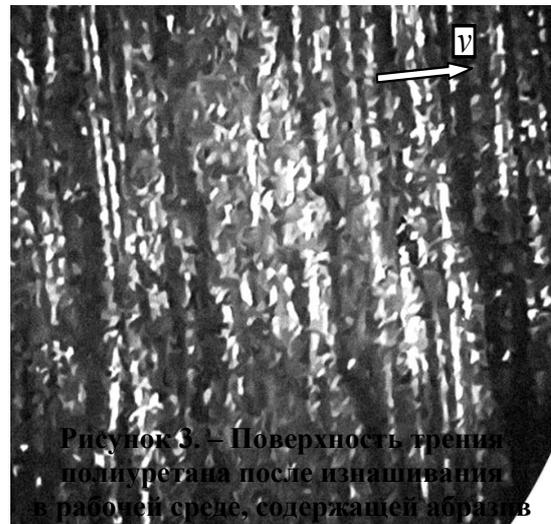
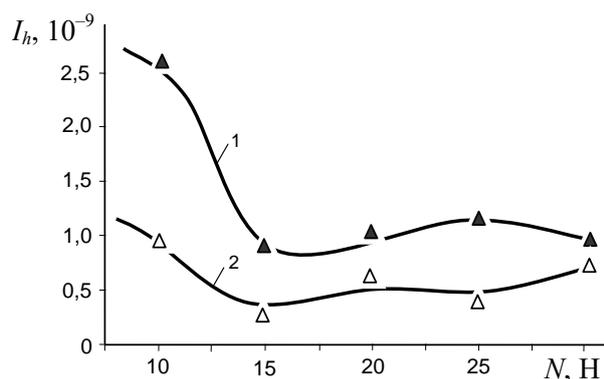


Рисунок 3. – Поверхность трения полиуретана после изнашивания в рабочей среде, содержащей абразив



1 – без покрытия; 2 – с покрытием из политетрафторэтилена

Рисунок 4. – Зависимость линейной интенсивности изнашивания полиуретана от нагрузки при трении по стали в рабочей среде, содержащей 10 мас. % абразивных частиц

полиуретана при трении скольжения по стали в водной среде, содержащей абразивные частицы. Показано, что зависимость линейной интенсивности изнашивания полиуретана от нормальной нагрузки графически изображается кривой с минимумом и максимумом. Такая зависимость объясняется глубиной внедрения в поверхностный слой полиуретана абразивных частиц и вероятностью их проникновения в зазор между сопрягаемыми деталями, которые определяют скорость протекания контактно-абразивного и усталостного видов изнашивания.

Увеличение концентрации абразива в водной среде сопровождается снижением интенсивности изнашивания полиуретана вследствие уменьшения его адгезионного взаимодействия со сталью и менее интенсивного усталостного разрушения поверхностного слоя.

Формирование покрытия из политетрафторэтилена повышает более чем в 2 раза износостойкость полиуретана, эксплуатирующегося в диапазоне нагрузок $10 \div 25$ Н. При более высоких нагрузках антифрикционное покрытие пластически отесняется при трении и практически не оказывает влияния на изнашивание манжет.

Список использованных источников

1. Ильский, А.Л. Расчет и конструирование бурового оборудования: учеб. пособие для ВУЗов / А.Л. Ильский, Ю.В. Миронов, А.Г. Чернобыльский. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
2. Моделирование процессов трения скольжения в паре поверхностно и объемно модифицированный эластомер – металл / В.Г. Назаров [и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – № 4. – С. 85.
3. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
4. Бродский, С.Г. Дegradaция гидравлических насосов и моторов при абразивном износе полидисперсным загрязнителем / Г.С. Бродский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006 – С. 51-57.

нию абразивной частицы и уменьшает тем самым вероятность микрорезания. Зависимости $I_h(N)$ образцов с покрытием и без него подобны по форме кривых в интервале нагрузок $10 \div 20$ Н и объясняются теми же причинами. Однако при $N > 25$ Н наблюдается не падение, а рост линейной интенсивности изнашивания материала манжеты с покрытием. По-видимому, в данном случае происходит пластическое отеснение политетрафторэтилена с поверхности трения манжеты, что увеличивает потерю ее массы, и реализуется переход к трению без покрытия. В результате I_h обоих образцов сближаются.

Выводы. Экспериментально изучены особенности изнашивания по-

5. Мышкин, Н.К. Трибология полимеров адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец, А.В. Ковалев // Трение и износ. – 2006. – № 4. – С. 429-443.

Информация об авторах

Богданович Павел Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология материалов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bstu@bstu.by.

Коднянко Максим Юрьевич – магистр технических наук, аспирант УО «Белорусский государственный университет транспорта», инженер-технолог, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Брундуков Алексей Сергеевич – магистрант УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: alexeybrundukov@gmail.com.

Стратанович Виталий Андреевич – магистрант УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: vitalystratanovich@gmail.com.

Information about the authors

Bogdanovich Pavel Nikolayevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department “Material science and technology”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bstu@bstu.by.

Kodnianka Maxim Yurievich – Master of Engineering Sciences, Post-graduate Student, Belarusian State University of Transport, Process engineer, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Brundukov Aliaksei Sergeevich – Master Student, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: alexeybrundukov@gmail.com.

Stratanovich Vitali Andreevich – Master Student, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: vitalystratanovich@gmail.com.

Поступила в редакцию 17.01.2020 г.

УДК 631.83.85:66.099.2(045)(476)

Кондратчик Н.Ю.¹, Высоцкая Н.А.², Францкевич В.С.³¹УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь²ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь³УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**МЕТОДЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ NPK-УДОБРЕНИЙ. СПОСОБЫ ГРАНУЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ПРЕССОВАНИЯ И ОКАТЫВАНИЯ**

Аннотация. В работе представлены технологические стадии гранулирования NPK-удобрений: подготовка исходного сырья, гранулирование, формирование структуры, сортировка. Описаны основные стадии технологического процесса производства NPK-удобрений на площадях промплощадки ОАО «Беларуськалий». Рассмотрены разнообразные схемы гранулирования с применением аппаратов различных по конструкции и по принципу действия, показаны их достоинства и недостатки. Представлены общие принципы подхода к выбору наиболее целесообразных методов гранулирования в зависимости от агрегатного состояния и физических свойств исходных веществ и от конкретного производства для получения качественного продукта по гранулометрическому составу.

Ключевые слова: гранулирование, NPK-удобрения, гранулятор, технология, методы, ретур, окатывание, прессование.

Kondratchik N.Yu.¹, Vysotskaya N.A.², Frantskevich V.S.³¹Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus²JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus³Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**NPK FERTILIZER GRANULATION METHODS. GRANULATION METHODS BY PRESSING AND ROLL BRIQUETTING**

Abstract. The paper presents the technological stages of granulation of NPK fertilizers: preparation of feedstock, granulation, structure formation, sorting. The main stages of the technological process for the production of NPK fertilizers on the areas of the industrial site of JSC "Belaruskali" are described. A variety of granulation schemes with the use of apparatuses of various designs and principles of operation are considered. Their advantages and disadvantages are shown. The general principles of the approach to the selection of the most appropriate granulation methods are presented, depending on the state of aggregation and the physical properties of the starting materials and on the specific production to obtain a high-quality product according to particle size distribution.

Keywords: granulation, NPK fertilizers, granulator, technology, methods, recycled material, pelletizing method, pressing.

Введение. Во многих отраслях промышленности (строительных материалов, химической, металлургической, пищевой и др.), а также в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы [1].

Правильно выбранные методы и условия гранулирования обеспечивают получение готового продукта с требуемыми качественными показателями. В настоящее время изучены, разработаны и освоены в промышленности разнообразные схемы гранулирования с применением аппаратов различных по конструкции и по принципу действия.

Процессы гранулирования минеральных удобрений разнообразны как по методам их осуществления, так и по аппаратурному оформлению.

В настоящее время, когда спрос на полезные ископаемые продолжает оставаться высоким, одной из наиболее важных и трудно решаемых проблем горного машиностроения является обеспечение надежности исполнительных узлов технологического оборудования, осуществляющего грануляцию NPK-удобрений методом окатывания. Внесение удобрений – крайне важный процесс для сельского хозяйства. Поэтому производство удобрений должно осуществляться таким образом, чтобы достичь необходимого качества и адекватной формы, удовлетворяющей потребителей.

Основная часть. NPK-удобрение – универсальное азотно-фосфорно-калийное минеральное удобрение, содержащее в легкоусвояемой форме все основные питательные элементы, которые обеспечивают сбалансированное питание растений.

Особенности и преимущества NPK-удобрения:

- обеспечивает повышенную прочность стеблей растений и устойчивость зерновых культур к полеганию;
- позволяет осуществлять индивидуальный подбор норм и способов внесения удобрения в зависимости от определенной культуры и почвы, путем выбора подходящего соотношения компонентов;
- добавление антислеживающих добавок обеспечивает длительное сохранение всех свойств удобрения: повышается сыпучесть и замедляется растворение, что значительно сокращает потерю азота при орошении.

Преимущества применения гранулированных удобрений следующие: удобрение в гранулах хорошо хранится, не слеживается, при внесении в почву хорошо рассеивается, при попадании в почву гранулы создают питательные зоны в прямой близости к корневой системе растений и посеянными семенами, удобно вносить, не разносятся ветром.

В общем случае гранулирование включает в себя следующие технологические стадии:

- подготовку исходного сырья, дозирование и смешение компонентов;
- собственно гранулообразование (агломерация, наслаивание, окатывание, кристаллизация, уплотнение и др.);
- формирование структуры (сушка, термостатирование, полимеризация и др.);
- сортировка (разделение частиц по размерам) и дробление крупных фракций с последующим выделением товарного продукта [2, 3].

Если химический состав продукта зависит от качества и соотношения исходных компонентов, то его физические и механические свойства формируются на всех стадиях технологического процесса. Особая роль в этом отводится гранулированию, в процессе которого закладываются форма, размер, плотность и структура частиц (размер частиц гранулированных удобрений в Европе, как правило, около 2-5 мм). В технологии производства минеральных удобрений одной из основных стадий формирования качества продукта является процесс гранулообразования с последующей или одновременной стабилизацией структуры (сушкой или охлаждением) и выделением товарной фракции. Неслучайно различные схемы производства удобрений называют по типу гранулятора, считая его основным аппаратом, формирующим структуру технологической линии. Совершенствование аппаратуры применительно к конкретным условиям эксплуатации оказывает решающее влияние на эффективность технологической линии [3].

Производство NPK-удобрений размещено на свободных площадях промышленной площадки ОАО «Беларуськалий». Выпуск комплексных сложно-смешанных удобрений производится методом паровой грануляции.

Основными стадиями технологического процесса являются:

- прием и складирование исходного сырья;

- подача исходных компонентов в производственный корпус;
- дозирование, измельчение и подача исходных компонентов в технологический процесс;
- приготовление шихты для гранулирования;
- гранулирование методом окатывания;
- сушка продуктов окатывания;
- очистка отходящих газов;
- классификация горячей продукции с отделением ретура;
- охлаждение надрешетного продукта;
- классификации охлажденного продукта;
- кондиционирование полуфабриката;
- складирование и отгрузка готовой продукции [4].

Технологическая схема производства комплексных сложно-смешанных минеральных NPK-удобрений предусматривает фасовку готовой продукции в мягкие контейнеры грузоподъемностью 1000 кг, мешки грузоподъемностью 25 кг, отгрузку навалом в железнодорожный и автомобильный транспорт.

Основными методами гранулирования фосфорсодержащих удобрений являются:

- разбрызгивание расплавов и охлаждение их в грануляционных башнях;
- прессование сухих порошков и тукосмесей;
- распыливание в псевдооживленном слое;
- окатывание, в том числе распыливание пульпы на поверхность частиц, сочетаемое с последующим окатыванием (этим методом гранулируют большую часть фосфорсодержащих удобрений).

Наиболее распространенным методом гранулирования в ОАО «Беларуськалий» [4] является прессование (рисунок 1). Реже используется метод окатывания.

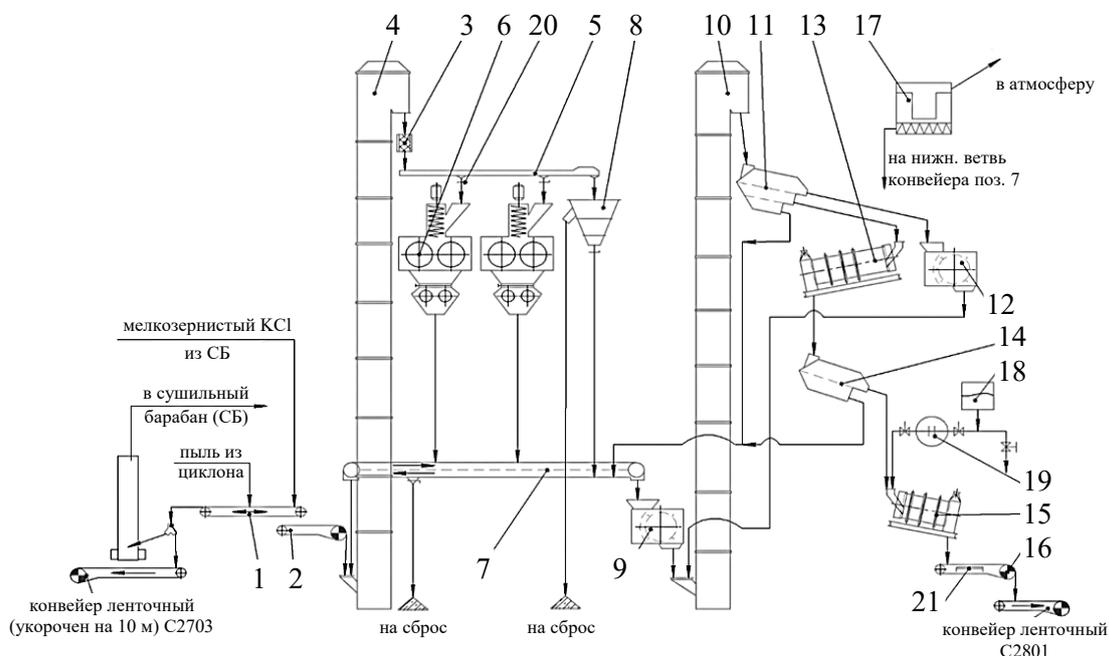


Рисунок 1. – Грануляция хлорида калия производительностью 50 тонн в час методом прессования

Компактирование (прессование) – процесс уплотнения мелкодисперсных сыпучих материалов между двумя вращающимися навстречу друг другу профилированными

валками в плитки, т.е. полосу материала определенной толщины. В отличие от традиционных методов влажной грануляции метод компактирования позволяет использовать сухие исходные материалы практически из неограниченного числа источников и без особых требований к размеру частиц. Данная технология приобретает все большее значение в промышленности, в частности, в связи с уменьшением энергетических затрат (которые являются основным фактором в процессах влажной грануляции).

Мелкокристаллический хлорид калия, нагретый до 95...100 °С, из сушильного барабана подается на ленточный реверсивный конвейер 1. На него же подается пыль из циклонов. Далее полученный продукт перегружается либо на ленточный конвейер 2 и подается в цех грануляции в ковшовый элеватор 4, который сбрасывает продукт через металлоулавливатель 3 на скребковый конвейер 5, либо на существующий конвейер линии мелкогранулированного продукта. Скребковый конвейер 5 оснащен донными шиберами 20, через которые заполняются загрузочные шахты вальц-прессов 6. Избыток продукта с конвейера 5 сбрасывается в бункер-накопитель с пересыпом 8, из которого подается на нижнюю ветвь скребкового конвейера 7 и возвращается в элеватор 4. При переполнении бункера 8 происходит сброс излишков на отметку 0.

Спрессованный вальц-прессами продукт в виде плиток через зубчатые дробилки (входят в состав вальц-прессов) поступает на щелевую плиту скребкового конвейера с просевом 7, где отделяется класс «–4 мм», который нижней ветвью конвейера подается в элеватор 4.

Плитка с верхней ветви конвейера 7 сбрасывается в дробилку 9, из которой дробленый продукт элеватором 10 подается на грохот 11, где происходит разделение продукта на 3 класса. Класс «+4 мм» идет на дробилку 12, из которой элеватором 10 возвращается на грохот 11. Класс «+2...–4 мм» из грохота 11 поступает в барабан-окатыватель 13, в котором с гранул удаляются острые кромки. Затем в грохоте 14 происходит разделение гранул и пыли. Пыль подается на нижнюю ветвь конвейера 7 обратно в процесс прессования, а гранулы загружаются в барабан обработки антислеживателем 15. В него же насосом-дозатором 19 из бака 18 подается антислеживатель. После обработки в барабане 15 готовый продукт ленточным конвейером 16 подается в транспортную систему завода. На конвейере 16 происходит взвешивание готового продукта конвейерными весами 21. Пыль из аспирационной системы 17 выгружается на нижнюю ветвь конвейера 7 и возвращается в процесс прессования.

Работа всего оборудования комплекса контролируется и управляется системой автоматизации, которая разрабатывается отдельно и поставляется вместе с комплектом технологического оборудования.

Преимущества процесса сухого компактирования:

- сухой процесс, не требующий добавления воды или связующего вещества;
- технология без добавления воды не требует сушки;
- потребление электроэнергии на 30 % меньше, чем при мокрой грануляции;
- стабильное распределение NPK по фракциям;
- утилизация дешевой мелкой фракции;
- быстрая смена NPK-рецептур;
- снижение сегрегации;
- эксплуатационные затраты ниже из-за отсутствия коррозии;
- очень низкий уровень выбросов, т.к. в техпроцессе не используется вода или газ;
- меньше размер инвестиций в оборудование (отсутствуют сушилка и охладитель), техпроцесс хорошо адаптируется к местным условиям (нет очень сложных технологий);

- удобрения, произведенные с помощью компактирования, менее склонны к слипанию (используются сухие компоненты) и, как следствие, снижение слеживаемости, способность к длительному хранению;

- улучшение характеристик текучести продукта;

- сокращение потерь при внесении удобрений в почву за счет снижения пылимости и вымывания из почвы.

Грануляция компактированием действительно очень универсальный и недорогой способ производства удобрений, что делает его особенно выгодным для производителей удобрений. Технологическая схема производства гранулированных NPK-удобрений методом прессования в ОАО «Беларуськалий» представлена на рисунке 2.

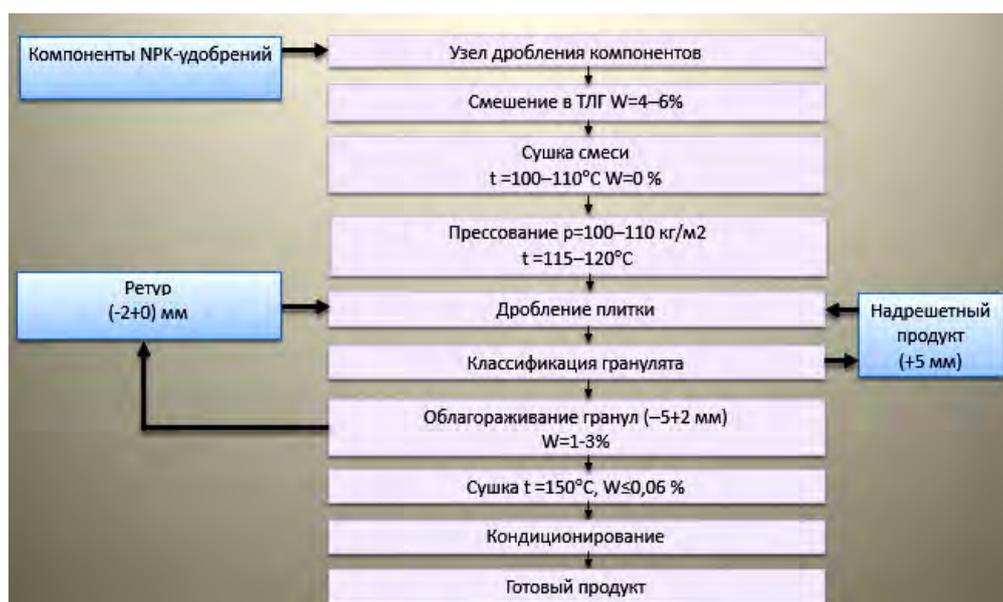


Рисунок 2. – Технологическая схема производства гранулированных NPK-удобрений методом прессования в ОАО «Беларуськалий»

Применение удобрения в виде тонкодисперсного порошка неэффективно из-за большого пылеуноса, потерь при транспортировании, гигроскопичности. На флотофабриках циклонную пыль подвергают совместному прессованию с мелкозернистым продуктом на валковых прессах, что приводит к ухудшению качества получаемого прессата. Комплексное изучение возможности переработки циклонной пыли путем агломерационного гранулирования в товарный продукт позволит улучшить качество основного продукта и снизить затраты на электроэнергию и расход пылеподавляющих реагентов [5].

Перспективность основного метода гранулирования фосфорсодержащих удобрений – окатывания – обусловлена применением агрегатов большой единичной мощности (40, 60 и 80 т/ч) для производства удобрений. Важнейшим направлением развития техники гранулирования фосфорсодержащих удобрений является создание безвыбросных производств, требующих использования концентрированных фосфорной и других кислот для получения расплава сложных удобрений. Гранулирование удобрений, достигаемое охлаждением расплавов, позволяет исключить стадию сушки и связанные с ней выбросы фтористых газов и аммиака, а также громоздкую систему абсорбции.

Гранулирование окатыванием включает следующие 4 стадии:

1 – смешение исходного вещества со связующим;

2 – формирование гранул из мелких частиц;

ном сечении барабана, образуя при этом плотную и равномерную завесу обрабатываемого материала во всем объеме основного барабана 1, в результате чего весь продукт многократно подвергается обработке распыленным плавом удобрения. При этом, продукт перемещается вдоль оси основного барабана 1 под действием угла наклона барабана 1 и 10, под действием подпора продукта, подаваемого в барабан приемно-транспортирующими желобами 6, в результате перемещения продукта подпорными лопастями 3, а также в результате сноса продукта факелом распыла плава удобрения при каждом пересыпании гранул продукта.

Продукт после его распределения в объеме лопастями 2 поступает на подпорные лопасти 4, которые, захватывая гранулы продукта, создают из него дополнительную завесу, что позволяет исключить проскок плава. Гранулированный продукт, пересыпаясь через подпорное кольцо 20, поступает в классификатор 8, где отделяется мелкая фракция продукта, которая подхватывается обратным шнеком 11, транспортируется в переднюю часть наружного барабана к направляюще-транспортирующим лопастям 12, с помощью которых через окна 7 продукт подается в основной барабан 1. Готовый продукт из классификатора 8 выгружается в камеру выгрузки 14 и отправляется на упаковку. Классификатор 8 постоянно очищается очистителем 9. Мелкая фракция гранул, возвращенная в основной барабан 1, по приемно-транспортирующим желобам 6 поступает на подпорные лопасти 3, которыми вновь подается в завесу из гранулированного материала для обработки плавом. Гранулы, изменив свой размер, распределительными лопастями 2 перемещаются вдоль оси барабана к зоне выгрузки в классификатор 8, в котором отделяется мелкая фракция гранул и выгружается готовый продукт. Этот цикл увеличения размеров гранул до заданного, регулируемого классификатором 8, проводится многократно. При необходимости через трубу 21 может подаваться воздух на охлаждение продукта в барабане 1.

Технологии комплексных удобрений с аппаратами аммонизатор-гранулятор – сушильный барабан (АГ-СБ). Основными преимуществами данной схемы являются:

- высокая производительность одной технологической линии;
- широкий ассортимент выпускаемых марок удобрений;
- низкие энергозатраты;
- возможность оперативного перехода между различными видами продукта;
- высокое качество готового продукта.

Аммонизатор-гранулятор – аппарат барабанного типа, совмещающий в себе процессы аммонизации и гранулирования. За счет тепла, выделяющегося при взаимодействии аммиака с кислотами, в АГ происходит также и подсушка материала. Это позволяет сократить энергозатраты на единицу продукции, а также продолжительность технологического цикла и количество необходимого оборудования в технологической линии по сравнению с другими способами.

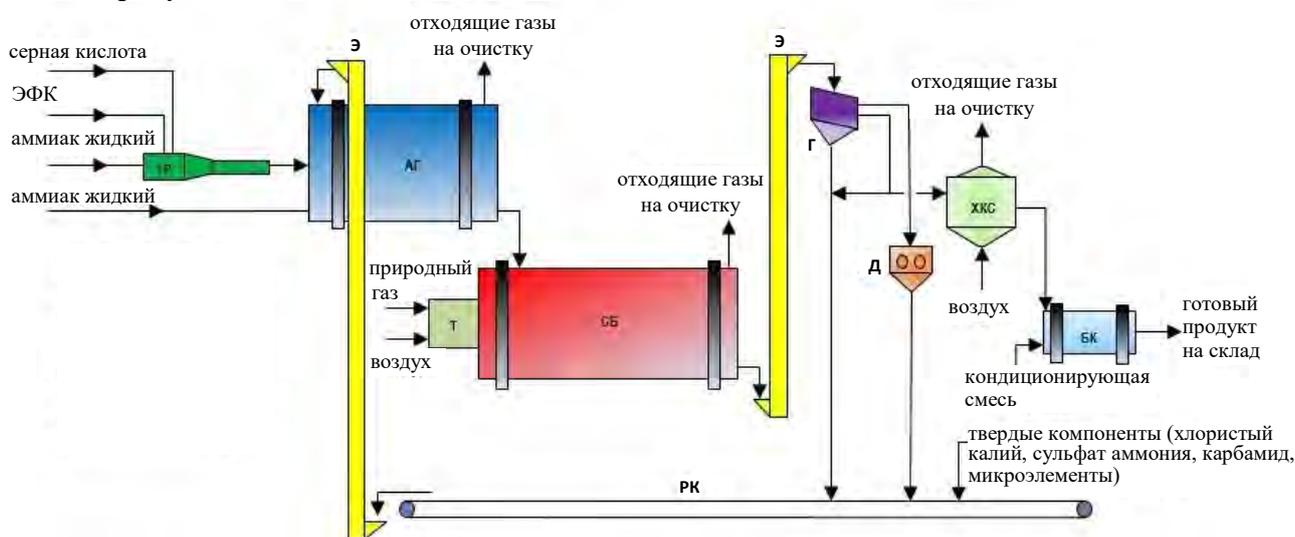
Аммонизатор-гранулятор – вращающийся барабан с закрепленными на нем бандажами, которыми барабан опирается на роликовые опорные станции. Материал на аммонизацию и гранулирование поступает через загрузочный лоток, расположенный в головной части аппарата. АГ устанавливается под углом 1-3° к горизонту, в результате чего материал перемещается через гранулятор к выгрузочной камере, расположенной в хвостовой части аппарата. В торцах барабана установлены подпорные кольца, которые обеспечивают необходимый уровень заполнения барабана. Во внутренней части барабана крепятся скребковое устройство для очистки внутренней поверхности от налипшего материала, распределитель аммиака, трубы для подачи аммиака, плава и пульпы, подъемное устройство. АГ различаются по размерам и внутреннему оформлению.

Аппараты АГ имеют достаточно высокую производительность. Технологическая линия, включающая в себя АГ, является высокопроизводительной. Совмещение в одном аппарате процессов смешения, аммонизации и гранулирования позволяет снизить энергозатраты, а также улучшить качество минеральных удобрений.

Габариты (диаметр и длина) гранулятора определяются целевой мощностью технологической нитки, а также ретурностью системы. Наибольшее распространение получили следующие АГ:

- 2,2×5 м для производительности по готовому продукту 20-30 т/ч;
- 4×8 м для производительности по готовому продукту 60-90 т/ч;
- 4,5×9 м для производительности 90-120 т/ч;
- 5×10 м для производительности по продукту 100-130 т/ч.

Схемы производства комплексных удобрений с использованием АГ представлены на рисунках 4 и 5.



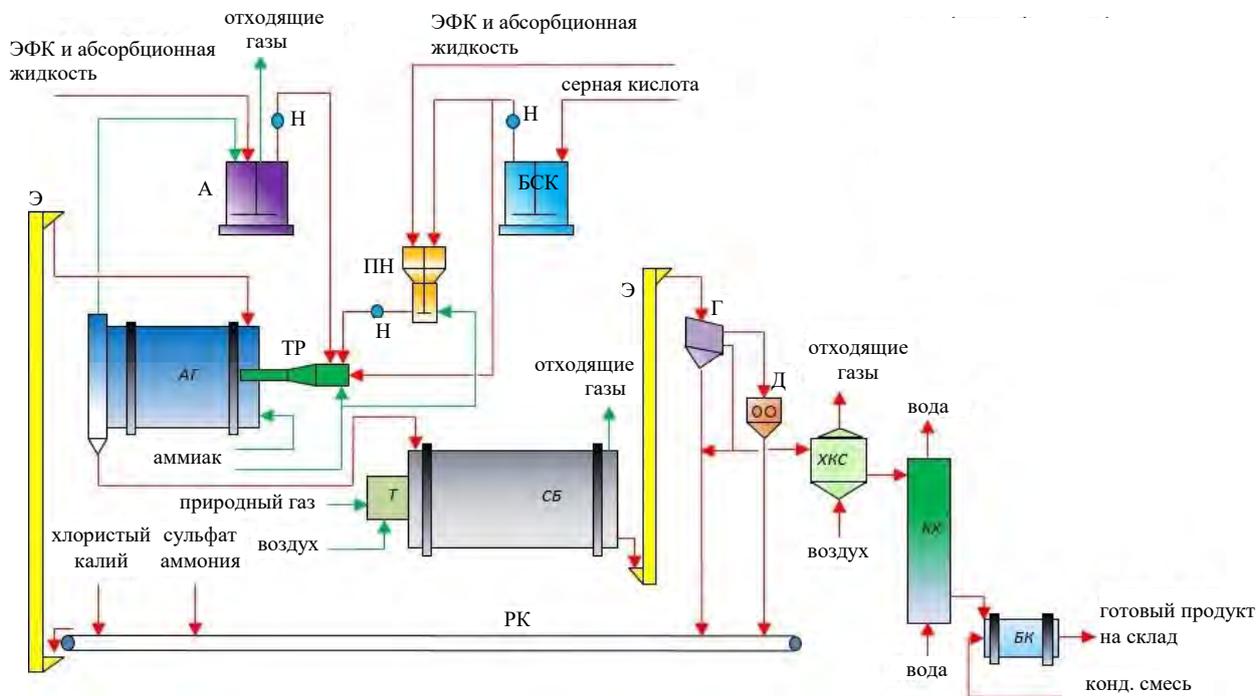
ТР – трубчатый реактор; СБ – сушильный барабан; Т – топка; Э – элеватор; Г – грохот;
Д – дробилка; ХКС – холодильник «кипящего слоя»; БК – барабан-кондиционер;
ЭФК – экстракционная фосфорная кислота; РК – ретурный конвейер

Рисунок 4. – Схема получения комплексных удобрений с использованием АГ и трубчатых реакторов

Схема включает в себя аммонизацию смеси серной и фосфорной кислот в трубчатом реакторе, гранулирование и доаммонизацию в АГ, сушку гранул в сушильном барабане, классификацию гранул с возвращением крупной после дробления и мелкой фракции, а также части товарной фракции в АГ в виде ретура через ретурный цикл. Готовый продукт охлаждают, обрабатывают кондиционирующей смесью для улучшения потребительских свойств и направляют на склад готовой продукции.

Использование схемы с АГ позволяет осуществлять выпуск таких удобрений как моноаммонийфосфат (МАФ, MAP), диаммонийфосфат (ДАФ, DAP), различные виды NPK-удобрений (с соотношением компонентов 9:25:25, 10:26:26, 13:19:19, 15:15:15, 16:16:8 и ряд других), различные виды NPS-удобрений (14:34:0+12S, 20:20:0+14S и ряд других), а также удобрений с микроэлементами и другими видами добавок. Для повышения доли азота и расширения ассортимента выпускаемой продукции возможно использование в качестве одного из азотсодержащих компонентов карбамида или нитрата аммония. Это позволяет осуществлять выпуск удобрений с соотношением компонентов 16:16:16, 17:17:17, 22:11:11, 19:9:19, 27:6:6, 20:10:10 и ряд других.

В ряде случаев целесообразно узел нейтрализации фосфорной и серной (азотной) кислот организовать по двухстадийной схеме: первая стадия в нейтрализаторе-испарителе (емкостном аппарате с мешалкой или скоростном аммонизаторе-испарителе), вторая стадия – в трубчатых реакторах (рисунок 5).



ПН – преднейтрализатор; А – абсорбер; БСК – бак серной кислоты; Н – насос; КХ – кондуктивный холодильник; остальные обозначения расшифрованы на рисунке 4
Рисунок 5. – Схема получения комплексных удобрений с использованием АГ и двухстадийной нейтрализации кислот

Реализация двухстадийной аммонизации позволяет:

- увеличить нагрузку по аммонизируемой пульпе и тем самым увеличить соотношение Ж:Т (жидкой фазы к твердой) на стадии грануляции, что необходимо для марок с низким содержанием фосфора: 15:15:15; 16:16:8; 20:20:0 + 14S;
- дает возможность увеличить расход серной кислоты на аммонизацию и, тем самым, заменить часть кристаллического сульфата аммония;
- использовать часть ЭФК в неупаренном виде.

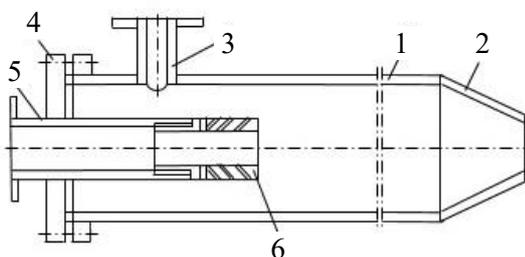
Предлагаемая проверенная и надежная технология АГ-СБ обеспечивает высокую единичную мощность, универсальность и гибкость производства за счет следующих усовершенствований:

- двухстадийной последовательной схемы аммонизации в преднейтрализаторе и 2-3 трубчатых реакторах;
- оптимального пространственного расположения в АГ и конструкции форсунок на выходе пульпопроводов;
- улучшенной конструкции внутренней насадки сушильного барабана;
- оптимального ретурного контура с минимальным числом оборудования и простого в управлении, но высокопроизводительного и надежного;
- эффективной системы охлаждения: аппарат «кипящего слоя» и кондуктивный аппарат;

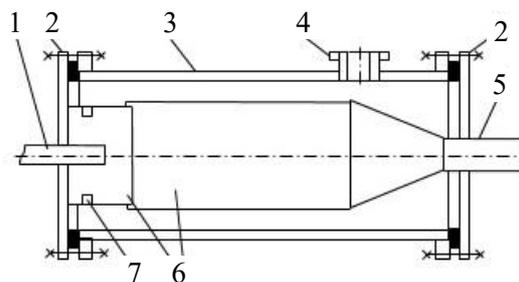
- оригинальной технологии улучшения качественных показателей готовой продукции за счет использования модифицирующих добавок;

- эффективной системы мокрой очистки абсорбер – Вентури-полый абсорбер-аппарат пенного слоя, обеспечивающей низкие показатели выброса загрязнителей и низкое потребление электроэнергии.

Трубчатые реакторы. Для повышения производительности АГ аммонизацию фосфорной кислоты необходимо предварительно проводить в трубчатом реакторе. На рисунках 6 и 7 представлены чертежи трубчатых реакторов. Предложенные конструкции реакторов позволяют минимизировать возможности налипания образующейся пульпы на внутренней насадке и корпусе, уменьшить металлоемкость и улучшить условия эксплуатации реактора.



1 – корпус; 2 – сопло; 3 – патрубок;
4 – крышки; 5 – патрубок подвода
аммиака; 6 – распределитель аммиака
Рисунок 6. – Трубчатый реактор



1 – патрубок ввода кислоты; 2 – фланцы с прокладками; 3 – корпус; 4 – патрубок ввода аммиака; 5 – патрубок выхода продукта; 6 – тонкостенная реакционная труба; 7 – сопла аммиака
Рисунок 7. – Трубчатый реактор [7]

Большинство из выпускаемых на данный момент сложных фосфорсодержащих минеральных удобрений производится методом окатывания с использованием связующего компонента на частицах ретурна в барабанных аппаратах.

Технологии комплексных удобрений с барабанным гранулятором-сушилкой (БГС). Технологии фосфорсодержащих удобрений с применением аппарата БГС получили широкое распространение, и в ряде случаев их применение предпочтительнее по сравнению с технологией с АГ. Достоинствами гранулирования в этом аппарате являются высокая интенсивность тепло- и массообмена, небольшая кратность внешнего рецикла (1-2), хорошее качество и узкий гранулометрический состав готового продукта, возможность автоматизации процесса.

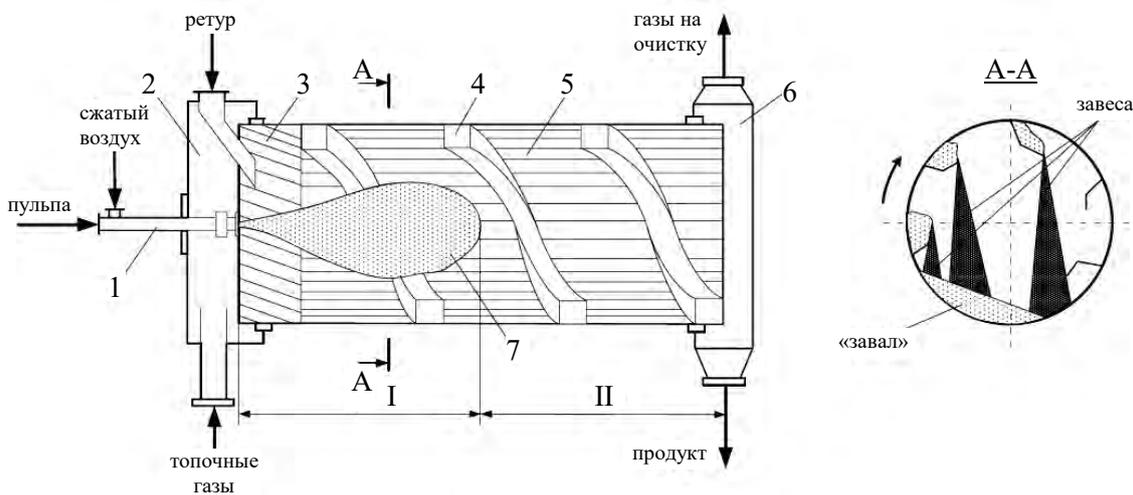
Широкое применение технологии удобрений на основе аппарата БГС обусловлено следующими причинами.

1. Наиболее универсальной с точки зрения перерабатываемого сырья является технология с аппаратом БГС, что связано с возможностью использования экстракционной фосфорной кислоты как в упаренном, так и неупаренном виде.

2. Технология с БГС позволяет производить широкий ассортимент удобрений высокого качества, в т.ч. удобрений, плохо поддающихся гранулированию методом окатывания: Р, РК, некоторые виды НРК. Помимо этого, удобрения, полученные по схеме с БГС, благодаря механизму гранулирования обладают высокой статической прочностью и высокой степенью сферичности. Получаемый продукт соответствует заданному узкому гранулометрическому составу.

Технологические линии с БГС очень компактны. Схемы с аппаратами БГС (рисунок 8) включают в себя меньше единиц оборудования, вследствие чего снижается расход электроэнергии, а также для их создания требуется меньше капитальных вложений. Бо-

лее короткая транспортная (ретурная) цепочка может обеспечить меньшее количество выходов оборудования из строя, что увеличивает эффективный рабочий фонд времени и снижает затраты на ремонт. Технологические нитки с аппаратами БГС традиционно считаются малоретурными, что также снижает энергозатраты и позволяет использовать транспортное оборудование меньшей производительности (и, соответственно, с меньшей стоимостью).



1 – форсунка; 2 – загрузочная камера; 3 – винтовая питающая насадка;
4 – обратный шнек; 5 – подъемно-лопастная насадка; 6 – разгрузочная камера;
7 – факел; I – зона гранулирования; II – зона досушки

Рисунок 8. – Барабанный гранулятор-сушилка

Механизм гранулообразования в БГС можно упрощенно представить состоящим из следующих этапов:

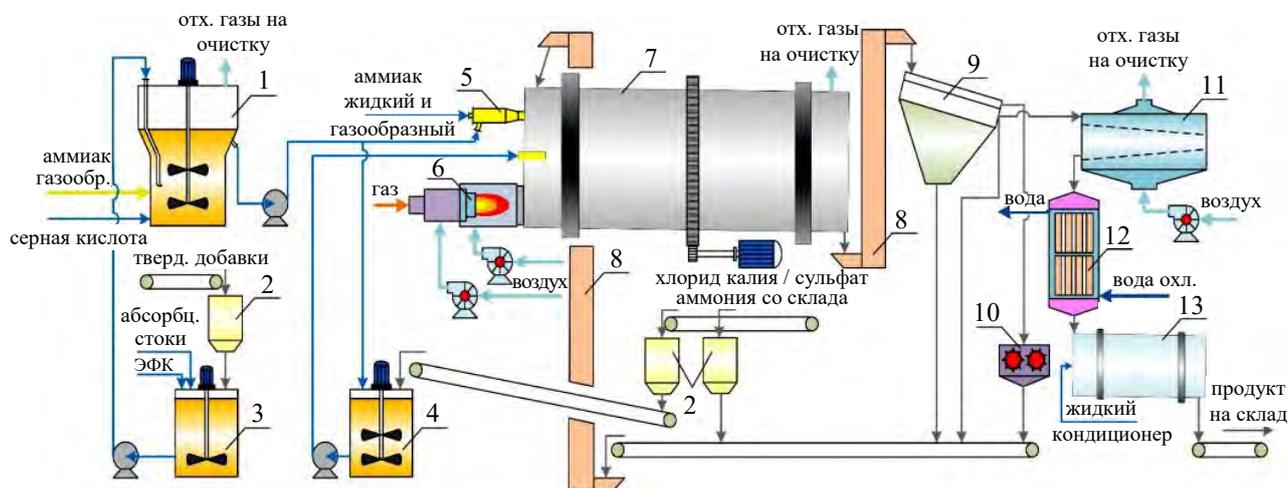
- нагрев частиц ретура, сыпавшегося с лопаток насадки в токе горячего теплоносителя (топочных газов);
- нанесение пленки жидкости на частицы ретура при прохождении их через объем факела распыливаемой пульпы;
- сушка увлажненных гранул в токе нагретых газов после их выхода из факела пульпы.

БГС представляет собой вращающийся барабан с внутренней подъемно-лопастной насадкой, установленный с наклоном 1-3° к горизонту (рисунок 8). Отличительной особенностью аппаратов БГС является наличие обратного шнека, позволяющего возвращать некоторое количество гранулированного материала в головную часть аппарата (внутренний ретур). При вращении барабана лопатки специального профиля, установленные внутри барабана, проходят через слой продукта в нижней части («завал»), захватывая его и затем ссылая, образуя при этом «завесу» по всему сечению. На эту завесу с помощью форсунки наносится перерабатываемая пульпа, диспергируемая с помощью сжатого воздуха (или за счет образующегося пара при работе с трубчатым реактором). В головную часть барабана также подают топочные газы и вводят внешний ретур. Для перемещения внешнего ретура в зону образования завесы головная часть БГС оснащена винтовой насадкой. При нанесении пульпы на частицы завесы происходит образование гранул, которые затем досушиваются. Максимальное количество пульпы, подаваемое на завесу, зависит от предельной влажности гранул, при которой начинается образование агломератов в «завале».

Габариты (диаметр и длина) аппарата определяются целевой мощностью технологической нитки, а также влажностью разбрызгиваемой пульпы. Наибольшее распростра-

нение в производстве фосфорсодержащих удобрений получили БГС (D×L): 3,5×14 м; 4,5×16 м.

Схема производства удобрений на основе фосфатов аммония (МАФ, ДАФ, НРК) с использованием БГС представлена на рисунке 9.



- 1 – преднейтрализатор; 2 – бункеры; 3 – сборник кислоты; 4 – бак смешения пульпы с хлористым калием; 5 – трубчатый реактор; 6 – топочно-горелочное устройство; 7 – БГС; 8 – элеваторы; 9 – грохот; 10 – дробилка; 11 – холодильник «кипящего слоя»; 12 – охладитель Solex; 13 – барабан-кондиционер

Рисунок 9. – Гибкая технологическая схема производства фосфорсодержащих удобрений с использованием аппарата БГС

Схема включает в себя нейтрализацию фосфорной кислоты (или смеси серной и фосфорной кислот) аммиаком в емкостном нейтрализаторе (или в скоростном аммонизаторе-испарителе (САИ)), доаммонизацию в трубчатом реакторе, гранулирование и сушку в БГС, классификацию гранул с возвращением крупной после дробления и мелкой фракции, а также части товарной фракции в БГС в виде ретура (возврата) через ретурный цикл. Готовый продукт охлаждают, обрабатывают кондиционирующей смесью для улучшения потребительских свойств и направляют на склад готовой продукции. Предусматривается предварительное смешение части аммонизированной пульпы и хлористого калия для улучшения гранулируемости, более глубокого протекания конверсионных химических процессов и снижения слеживаемости готового продукта. Для дополнительного снижения слеживаемости и пылимости комплексных удобрений предусматривается использование магнийсодержащих добавок (магнезит, брусит). Данный способ включает в себя смешение магнийсодержащей добавки с фосфорной кислотой и последующую подачу на нейтрализацию.

Существуют технологические схемы, оснащенные аппаратами БГС и не имеющие внешнего ретура. В них крупная фракция после отсева поступает на дробление и затем возвращается на повторный сев, а мелкая фракция подается в БГС на обратный шнек. Но это решение не является наилучшим как по производительности, так и с точки зрения стабилизации технологии и качества продукта. Опытным путем установлено, что только сочетание внешнего и внутреннего ретура является оптимальным для схем с аппаратом БГС [8, 9].

Особенностью гранулирования и сушки удобрений в БГС является периодическое колебание гранулометрического состава и связанное с этим изменение массовых расхо-

дов ретура и готового продукта. Эти процессы оказывают негативное влияние и на свойства удобрений. Для стабилизации процессов гранулирования и сушки, а также для получения качественных показателей продукта необходимо поддерживать определенный расход и качество внешнего ретура [10-12].

По количеству ретура, поступающего в грануляционный аппарат со стадий дробления и отсева, методы гранулирования можно классифицировать на ретурные и безретурные. К первым относятся методы гранулирования путем агломерирования. В зависимости от количества ретура условно гранулирование может быть малоретурным с кратностью ретура до 5 (число весовых единиц ретура на 1 вес. единицу готового продукта) и многоретурным с кратностью более 5.

В большинстве случаев при гранулировании сложных и сложно-смешанных удобрений ретур вводится в грануляционный аппарат для поддержания оптимальной влажности и обеспечения максимального выхода товарной фракции [13].

В отдельных случаях, при гранулировании удобрений методом прессования либо гранулирования суперфосфата методом окатывания в присутствии влаги, ретур не требуется, однако он образуется в процессе гранулирования. В этих случаях стремятся вести процесс с минимальным выходом ретура мелкой фракции.

К безретурным методам гранулирования относится отверждение капель плава потоком воздуха или в масле. [14].

В процессе гранулирования между частицами образуются определенные связи, которые обеспечивают пластичность материала и позволяют изменять форму гранул без их разрушения [15-18]. Для получения готового продукта необходимо упрочнить связи, придав жесткость полученной в процессе гранулирования структуре. Это достигается удалением жидкой фазы или переводом ее в твердую в процессе сушки гранулята, что приводит к интенсивной кристаллизации твердых компонентов внутри гранулы. Для гранул, подвергающихся длительному хранению и транспортированию, процесс сушки очень важен.

В процессе сушки образуются новые фазовые контакты, кристаллические спайки между отдельными частицами гранулы, приводящие к увеличению прочности. Конечное содержание влаги в продукте в значительной мере определяет физико-механические свойства (прочность, слеживаемость, гигроскопичность и др.), а с увеличением содержания влаги физико-механические свойства значительно ухудшаются. Влага, входящая в состав гранул, включает поверхностную влагу, удерживаемую в гранулах механическими силами сцепления, сорбционную влагу, удерживаемую вследствие адсорбции и абсорбции, и капиллярную влагу, заполняющую капилляры и поры гранул.

Процесс сушки протекает с определенной скоростью, которая зависит от формы связи влаги с материалом и механизма превращения в нем влаги, при этом длительность процесса сушки определяется следующими факторами:

- структурой материала и формой связи влаги с ним;
- размерами частиц высушиваемого материала;
- величиной начальной и конечной влажности материала, а также его температурой;
- параметрами теплоносителя (температура, влагосодержание, скорость).

Заключение. Развитие техники гранулирования обычно тесно связано с общим развитием технологии производства того или иного продукта. Выбор метода гранулирования зависит от конкретного производства. Так, методы гранулирования полимерных материалов оказываются непригодными для гранулирования минеральных удобрений и наоборот. Тем не менее, существуют общие принципы подхода к выбору наиболее целесообразных методов гранулирования в зависимости от агрегатного состояния и физических свойств исходных веществ.

Большинство из выпускаемых на данный момент сложных фосфорсодержащих минеральных удобрений производится методом окатывания с использованием связующего компонента на частицах ретура в барабанных аппаратах [3].

Рассмотренный барабанный гранулятор для гранулирования минеральных удобрений позволяет получать гранулированный продукт более узкой фракции, перерабатывать нестандартный продукт в продукт первой и высшей категории качества по гранулометрическому составу, значительно повысить прочность гранул и снизить их истираемость (разрушение) в процессе транспортирования.

Список использованных источников

1. Шкарпеткин, Е.А. Анализ методов получения гранул и средств их реализации / Е.А. Шкарпеткин // Наука и современность. – 2010. – С. 378-383.
2. Горр, Д.А. Создание технологии приготовления топливных гранул и разработка технологических основ их использования: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Д.А. Горр. – Москва, 2014. – 133 л.
3. Кочергин, С.А. Повышение эффективности производства сложных минеральных удобрений путем оптимизации процессов гранулирования и сушки: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / С.А. Кочергин. – Иваново, 2008. – 114 л.
4. Технология производства NPK-удобрений [Электронный ресурс] / ОАО «Беларуськалий», Солигорск, 2015. – Режим доступа: https://kali.by/production/technology/technology_for_producing_NPK. – Дата доступа: 18.12.2019.
5. Черепанова, М.В. Оптимизация сушки гранул хлорида калия, полученных путем агломерационного гранулирования циклонной пыли методом окатывания / М.В. Черепанова, А.Р. Хасанова // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2013. – № 2. – С. 39-49.
6. Классен, П.В. Основы техники гранулирования (Процессы и аппараты химической и нефтехимической промышленности) / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М.: Химия, 1982. – 272 с.
7. Реактор для аммонизации кислот: пат. 2533713 РФ, МПК В01F3/04, В01F5/00 / И.Г. Гришаев; заявитель ОАО «НИИ по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова». – а2013114552/05; заявл. 02.04.13; опубл. 20.11.14 // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности. – 2014. – № 32.
8. Технология гранулированного диаммонийфосфата из неконцентрированной экстракционной фосфорной кислоты / А.М. Норов [и др.] // Химическая технология. – 2011. – № 10., Т. 12. – С. 589-593.
9. Норов, А.М. Разработка технологии диаммонийфосфата из неконцентрированной экстракционной фосфорной кислоты с использованием барабанного гранулятора-сушилки: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 / А.М. Норов. – Череповец, ОАО «НИУИФ», 2014. – 130 л.
10. Разработка норм оптимального технологического режима производства гранулированного диаммонийфосфата из неконцентрированной фосфорной кислоты / А.М. Норов [и др.] // Химическая технология. – 2012. – № 11, Т. 13. – С. 641-647.
11. Гришаев, И.Г. Производительность барабанного гранулятора-сушилки и качество фосфатов аммония / И.Г. Гришаев, А.М. Норов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 22-23.
12. Гришаев, И.Г. Разработка конструкции барабанных грануляторов-сушилок для производства минеральных удобрений: Труды НИУИФ / И.Г. Гришаев. – М., 2009. – С. 154-158.
13. Классен, П.В. Методы гранулирования фосфатов аммония / П.В. Классен // Химическая промышленность. – 2000. – № 2. – С. 85.

14. Методы гранулирования удобрительных композиций / А.А. Болысбек [и др.] // Технические и естественные науки: сб. избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие», Санкт-Петербург, 26-28 июня 2019 г. / ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 178-180.

15. Классен, П.В. Гранулирование / П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.П. Шомин. – М.: Химия, 1991. – 240 с.

16. Способ гранулирования тонкодисперсных материалов и устройство для его осуществления: пат. 99100811 РФ, МПК В01J2/00 / Л.И. Барышникова, С.А. Виноградов, О.Е. Кабанова [и др.]; заявитель Л.И. Барышникова, С.А. Виноградов, О.Е. Кабанова [и др.]. – № 99100811/12; заявл. 11.01.99; опубл. 20.11.00 // Открытия. Изобретения / Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 2000.

17. Способ получения гранулированного хлористого калия: пат. 2157356 РФ, МПК С05D1/00, С01D3/22 / Ю.С. Сафрыгин, Ю.В. Букша, Г.В. Осипова [и др.]; заявитель ОАО «Уралкалий». – № 99104685/12; заявл. 10.03.99; опубл. 10.10.00 // Открытия. Изобретения / Российское агентство по патентам и товарным знакам. – 2000.

18. Способ кондиционирования гранулированных удобрений: пат. 2307115 РФ, МПК С05G3/10, С05B7/00, В01J2/28, С05G5/00 / И.Г. Гришаев, А.Я. Сырченков, И.Н. Громова [и др.]; заявитель ОАО «НИИ по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова». – № 2006119539; заявл. 06.06.06; опубл. 27.09.07 // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности. – 2007. – Бюл. № 27.

Информация об авторах

Кондратчик Наталья Юрьевна – аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет», старший преподаватель УО «Барановичский государственный университет» (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Брестская область, Беларусь), e-mail: barsu@brest.by.

Высоцкая Надежда Александровна – аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет», заместитель начальника отдела научно-технической информации ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Францкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: fvs2@tut.by.

Information about the authors

Kondratchik Natalia Yurievna – Post-graduate Student, Belarusian State Technological University, senior lecturer of Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Belarus), e-mail: barsu@brest.by.

Vysotskaya Nadezhda Aleksandrovna – Post-graduate Student, Belarusian State Technological University, Deputy Head of the Department of Scientific and Technical Information of the JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – Ph. D. (Engineering), Head of the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Silicate Production, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: fvs2@tut.by.

Поступила в редакцию 05.02.2020 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.789:669.018.256(045)(476)

Жигалов А.Н., Богдан Д.Д.*Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Беларусь***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕТОДА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО
ЗВУКОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
И ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВК8**

Аннотация. *Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками. Твердосплавные пластины В35 (аналог ВК8), упрочненные методом АДУ, при обработке чугуна СЧ20 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 1,6...3,5 раза. Проведены рентгено-графические исследования твердого сплава ВК8. У упрочненных методом АДУ образцов снижены внутренние напряжения и искажения в кристаллических решетках. Уменьшение плотности дислокаций образцов сплава ВК8, упрочненных методом АДУ, составляет 16,9 % по сравнению со стандартными.*

Ключевые слова: *твердые сплавы, метод аэродинамического звукового упрочнения, плотность дислокаций.*

Jigalov A.N., Bogdan D.D.*Baranovichi State University, Baranovichi, Belarus***RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE METHOD OF AERODYNAMIC
SOUND HARDENING ON THE STRUCTURAL-PHASE COMPOSITION
AND THE DENSITY OF DISLOCATIONS OF WC8 CARBIDE ALLOY**

Abstract. *The method of aerodynamic sound hardening (ASH) significantly increases the durability of hard-carbide tools working with shock loads. Hard-carbide plates B35 (analogue WC8) hardened by the method of ASH when milling cast iron GC20 are resistant 1,6... 3,5 times more than the same non-hardened plates. X-ray diffraction studies of the WC8 hard alloy were carried out. In ASH-hardened samples, internal tensions and distortions in crystal lattices are reduced. The decrease in the dislocation density of WC8 alloy samples hardened by the ASH method is 16,9 % compared to standard ones.*

Keywords: *hard-carbide alloys, the method of aerodynamic sound hardening, density of dislocations.*

Введение. Метод аэродинамического звукового упрочнения (АДУ) существенно повышает стойкость твердосплавного инструмента, работающего с ударными нагрузками [1]. Твердосплавные пластины В35 (аналог ВК8), упрочненные методом АДУ, при обработке чугуна СЧ20 превышают по стойкости аналогичные неупрочненные пластины в 1,6...3,5 раза [2]. Для исследования структуры твердых сплавов ВК8, применяемых при добыче калийных удобрений, после упрочнения АДУ проведены рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ.

Методика исследований. Для определения фазового состава использовался метод рентгеновской дифракции. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре «ULTIMA IV» фирмы Rigaku общего назначения в CuK_α излучении с вращени-

ем образца в собственной плоскости. Дифрактометр оснащен системой автоматизации, включающей аппаратную часть, предназначенной для автономной реализации на базе компьютера всех функций управления гониометром и обслуживания процесса сбора данных, и программную часть, содержащую пакет программ «PDXL2» по обработке и анализу полученных данных. В основе метода измерения лежит дифракция рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке. Сбор и обработка информации осуществляется с помощью программы «Standard Measurement». Расшифровка фазового состава полученной рентгенограммы проводится в программе «PDXL2». Идентификация фазового состава проводилась в режимах: автоматического поиска эталонных образцов в полной базе данных ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB) и COD, включающих более 250 тысяч карточек; создания собственной базы данных в программе «PDXL2» по данным эталонного состава, известной сингонии и др., значительно сужающей число эталонных карточек, позволяющей повысить точность и увеличить скорость индентирования рентгенограмм. По анализу рентгенограмм сравнения проводился отбор и идентификацию фазового состава образца. Результаты идентификации фазового состава включают в себя данные о параметрах рентгеновского спектра, подобранных карточках (название, химическая формула и номер), характеристике пиков (углов, межплоскостного расстояния, интенсивности, полуширины и принадлежности к карточке).

Подготовка к выполнению исследований заключалась в приведении рентгеновского дифрактометра «ULTIMA IV» к работе в соответствии с руководством № ME11559A02 на него. Рентгеновский дифрактометр «ULTIMA IV» подключался к персональному компьютеру с необходимым программным обеспечением. Выполнение измерений осуществлялось по следующему алгоритму: включался рентгеновский дифрактометр «ULTIMA IV» и выдерживался 30 минут для стабилизации работы рентгеновского излучения; запускалась программа «Automatic Alignment (Right systems)» для проведения автоматической юстировки; подготавливались образцы для проведения рентгенофазового анализа; проводилась полная съемка рентгенограммы исследуемого образца в программе «Standard Measurement» в непрерывном режиме с шагом по углу $0,1^\circ - 0,5^\circ$ в интервале углов $2\Theta = 3^\circ - 150^\circ$ (данные условия съемки выбирались с учетом нахождения линий предполагаемых фаз картотек ICDD (PDF-2 Release 2016 RDB) и COD); запускалась программа «PDXL2» по расшифровке фазового состава; отчет по фазовому составу в виде таблиц и рентгенограмм сохранялся в файл; после окончания анализа производилась очистка поверхностей системы.

Экспериментальному исследованию влияния метода АДУ на фазовые превращения структуры подвергались твердосплавные вставки ВК8 формы Г65, изготовленные по ГОСТ 880-75. Для чистоты эксперимента образцы нумеровались и исследовались в случайном порядке без учета их номерного состояния. Структура и размер зерна определялись с применением ГОСТ 9391-80, ГОСТ 4872-75. На рабочих сторонах вставок приготавливали шлифы. В силу специфических особенностей материала приготовление шлифов весьма затруднительно. Поэтому, выявляли зоны удовлетворительной полировки – участки, выделенные кругом (рисунок 1), на которых проводили исследования. Микроструктуру материала изучали на нетравленных и протравленных образцах. Травление осуществляли 4 %-ным раствором пикриновой кислоты в воде. На участках (выделенных кругом), имеющих зоны удовлетворительной полировки, проводили выявление микроструктуры и съемку. В результате травления выявлены светлые и темные зерна, имеющие прямоугольные границы, и зерна сглаженной формы. Для выяснения фазовой принадлежности данных зерен проводился анализ элементного состава.

Выявление микроструктуры и элементного состава, а также съемку проводили на участках (выделенных кругом на рисунке 1) удовлетворительной полировки на оп-

тическом микроскопе (ОМ) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) SAMSCAN с рентгеноспектральным микроанализатором EDX INCA 350 при увеличении $\times 1000$, $\times 2100$, $\times 4200$, световом микроскопе «MeF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличении $\times 200$, $\times 500$, сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы «Oxford Instruments Analytical» (Великобритания). Фиксацию изображения проводили на металлографическом комплексе «Микро 200» с использованием видеокамеры и выводом изображения на монитор персонального компьютера. Погрешность применяемых методов составляла не более пяти-восьми относительных процентов. С помощью оптической микроскопии изучались поверхностные слои. Изучение кристаллических объектов методами сканирующей микроскопии позволяло на основании дифракции электронов определять контрасты электронно-микроскопического изображения.



Рисунок 1. – Макроснимки твердосплавных вставок ВК8 с указанием поверхности шлифа и участков съемки микроструктуры

Исследования дефектов кристаллической решетки проводилось по уширению линий на рентгенограммах поликристаллов. Так, уширение, обусловленное дисперсностью областей когерентного рассеяния, пропорционально $\sec\Theta$ (угол рассеяния дифракционной линии в град.), наличие в решетке напряжений II рода (микронапряжений) приводит к уширению, пропорциональному $\tg\Theta$, а дефекты упаковки вызывают уширение, пропорциональное $\sec\Theta$ [3]. Исходя из того, что физическое уширение дифракционных линий, обусловленное дислокациями, удовлетворительно коррелирует с данными прямых методов фиксации дислокаций при помощи рентгеноструктурного анализа [4, 5], то, согласно [4], плотность дислокаций определялась из выражения:

$$\rho = \frac{m_p \beta_n^2 \operatorname{ctg}^2 \Theta}{b^2}, \quad (1)$$

где m_p – коэффициент, учитывающий тип дислокаций кристаллической решетки, $m_p = 1,0$ [4, 6];

β_n – физическое уширение дифракционной линии, рад.;

b – вектор Бюргера, $b = 1,25 \cdot 10^{-10}$ м [4].

В ряде случаев плотность дислокаций ρ определяли по формуле:

$$\rho = \frac{3}{D_6^2}, \quad (2)$$

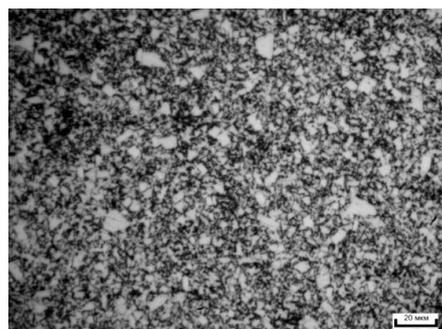
где D_6 – размер блоков, $D_6 = 0,94\lambda R_u / \beta_{hkl} \cos_{hkl}$;

R_u – интегральная интенсивность, характеризующая отражательную способность;

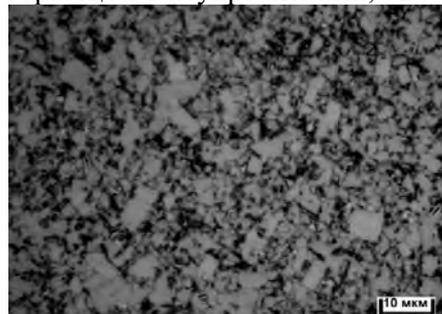
β_{hkl} – физическое уширение дифракционных линий, обусловленное только дефектами кристаллической решетки и/или размером кристаллитов, при индексах дифракционных линий h, k, l ;

\cos_{hkl} – косинус углов дифракционных линий отражения при индексах h, k, l .

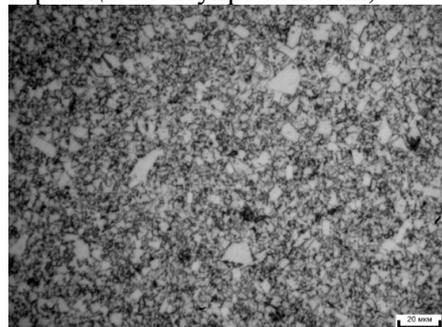
В расчетах использовался показатель $B_{гр}$ – графическое уширение дифракционных линий, обусловленное геометрией съемки, а также дефектами кристаллической решетки и/или размером кристаллитов. Снимки микроструктуры поверхностных слоев образцов стандартных и упрочненных АДУ из сплава ВК8 представлены на рисунке 2.



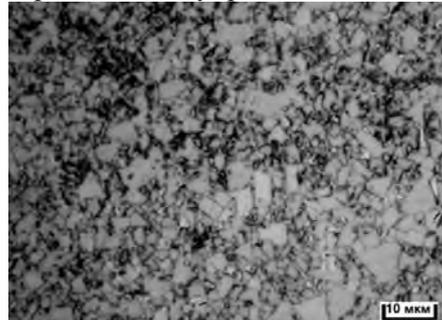
образец № 1 неупрочненный, $\times 200$



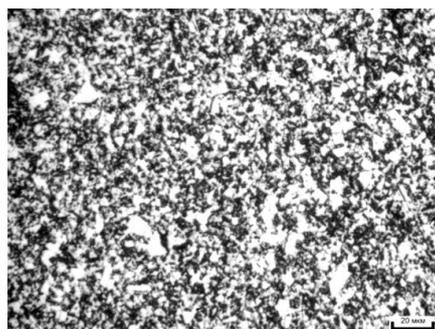
образец № 1 неупрочненный, $\times 500$



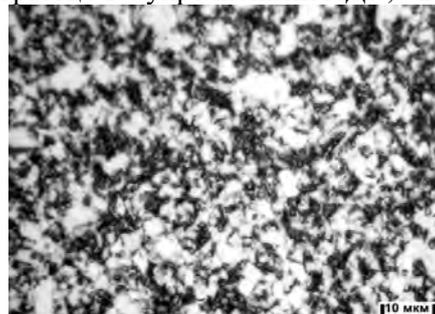
образец № 2 неупрочненный, $\times 200$



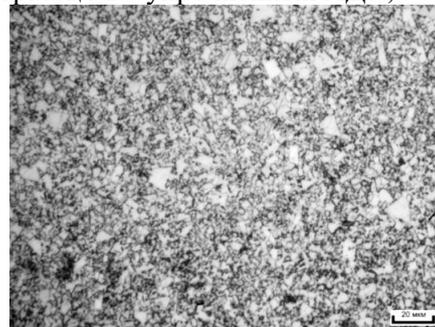
образец № 2 неупрочненный, $\times 500$



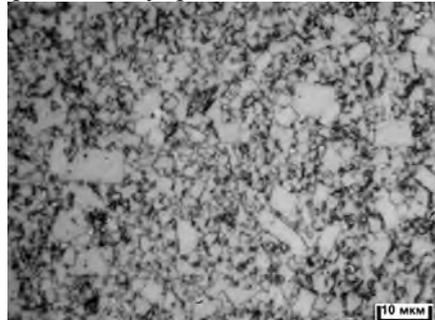
образец № 3 упрочненный АДУ, $\times 200$



образец № 3 упрочненный АДУ, $\times 500$



образец № 4 упрочненный АДУ, $\times 200$



образец № 4 упрочненный АДУ, $\times 500$

Рисунок 2. – Микроструктура поверхности образцов сплава ВК8

На поверхностных слоях образцов стандартных и упрочненных АДУ четко прослеживается различие в структуре образцов.

Стандартные образцы имеют не совсем внятную структуру, хотя крупные с прямыми границами зерна явно принадлежат фазе WC, присутствует большое число рефлексов, расположенных по окружности, что свидетельствует о наличии в структуре сильно разориентированных зерен. Границы видимых зерен искажены, ряд зерен имеет размытые границы, в микроструктуре наблюдается большое число контуров экстинкции – ослабления пучка света при его распространении в сплаве за счет совместных действий при поглощении и рассеивании света. Это свидетельствует об искажениях кристаллической решетки и о наличии высоких внутренних напряжений, что характерно для неравновесных границ зерен и кристаллов, образованных в твердом сплаве в результате интенсивной пластической деформации.

У упрочненных методом АДУ образцов контуры межзерновых границ четче выделены, имеют более явные очертания, эффект экстинкции присутствует в значительно меньшей степени. Это указывает об уменьшении внутренних напряжений и снижении искажений в кристаллических решетках, на наличие невысокой плотности дислокаций.

На рисунках 3, 4 представлены рентгеновские спектры стандартных (рисунок 3) и упрочненных АДУ (рисунок 4) образцов твердого сплава ВК8 с наличием кобальта с кубической решеткой (β – Co) и отсутствием кобальта с гексагональной решеткой (α – Co). На рисунках 5, 6 представлены рентгеновские спектры стандартных (рисунок 5) и упрочненных методом АДУ (рисунок 6) образцов ВК8 с отсутствием η -фазы (Co₂W₄C).

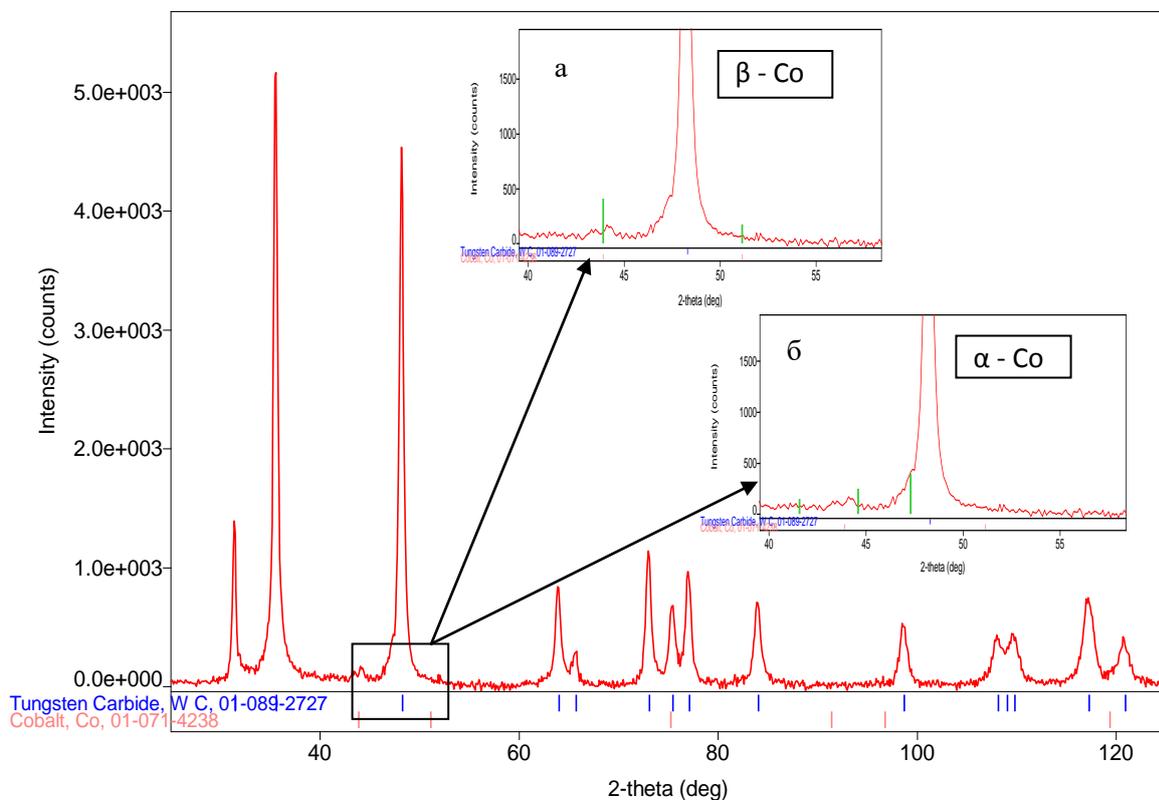


Рисунок 3. – Рентгеновский спектр стандартного образца твердого сплава ВК8 при наличии β – Co (а) и отсутствии α – Co (б)

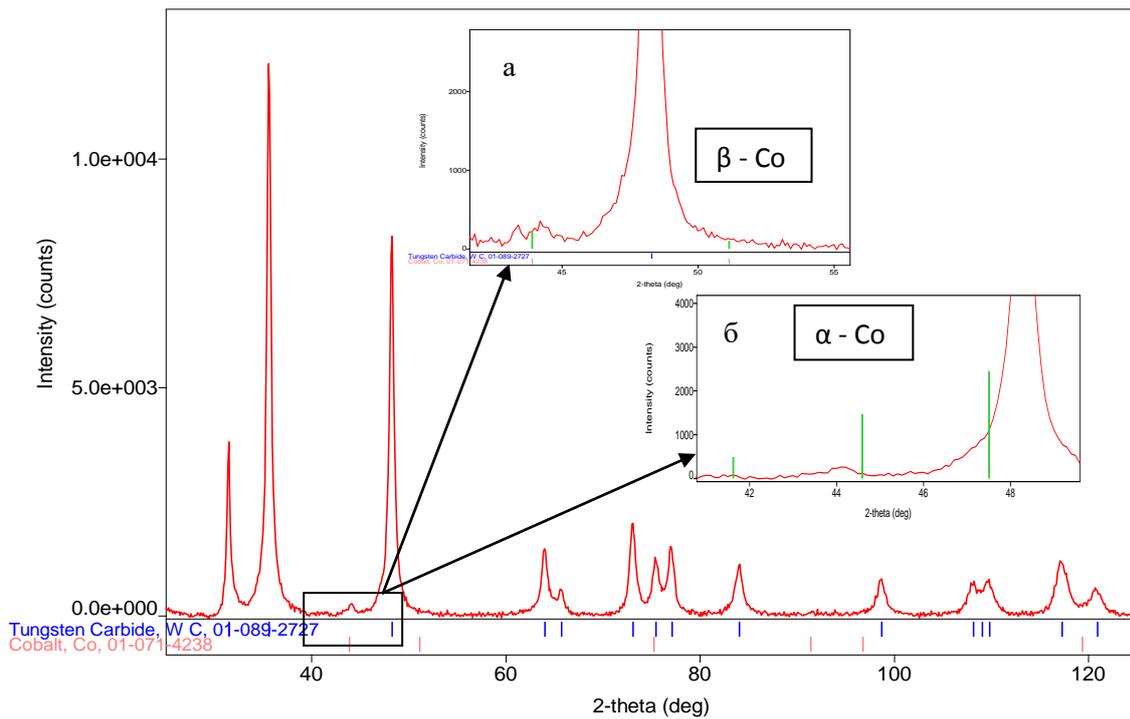


Рисунок 4. – Рентгеновский спектр образцов твердого сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, при наличии β – Co (а) и отсутствии α – Co (б)

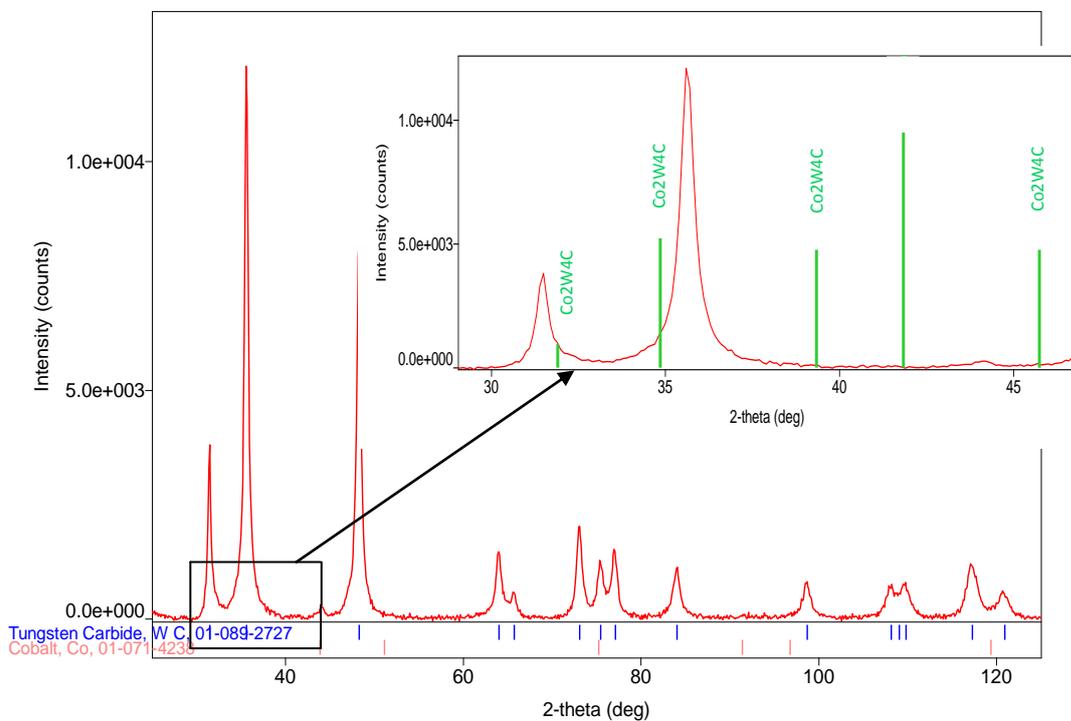


Рисунок 5. – Рентгеновский спектр стандартного образца твердого сплава ВК8 с отсутствием η -фазы ($\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$)

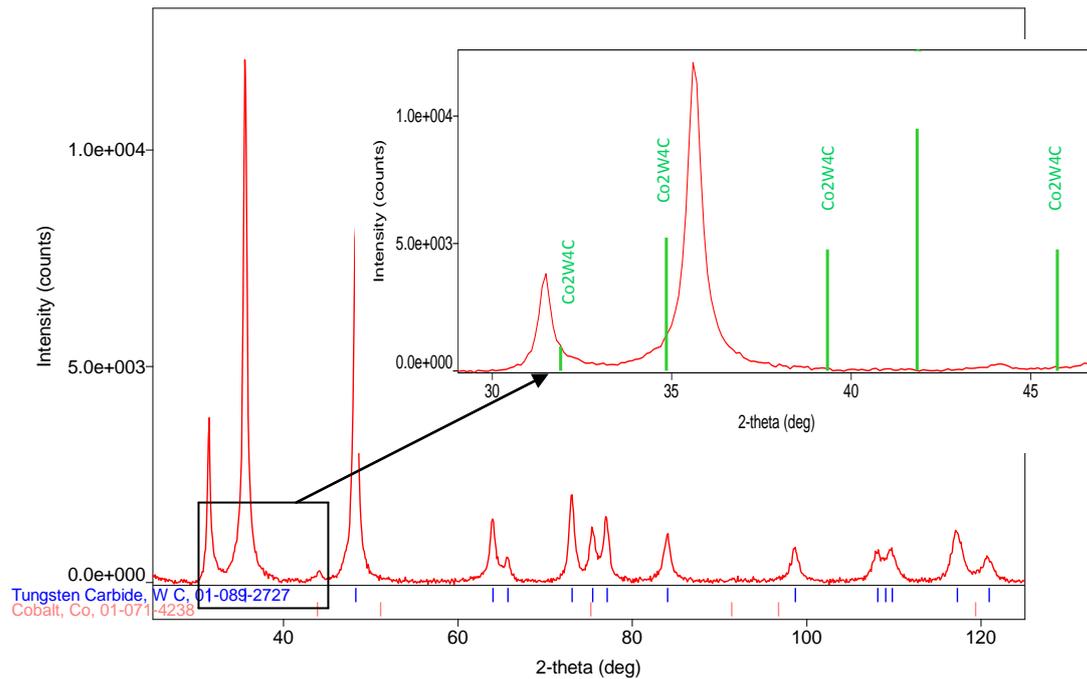


Рисунок 6. – Рентгеновский спектр образца твердого сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, с отсутствием η -фазы ($\text{Co}_2\text{W}_4\text{C}$)

В таблицах 1 и 2 приведены данные по физическому уширению дифракционных линий от карбидов, входящих в состав твердого сплава ВК8, до и после АДУ соответственно.

Таблица 1. – Параметры пиков стандартного образца твердого сплава ВК8

№	2Θ , град.	d , Å	Высота (отсчеты)	FWHM (град.)	Площадь	$B_{\text{гр}}$, град.	β , 10^{-3} рад.
1	31,375(19)	2,8488(17)	942(31)	0,377(19)	544(12)	0,58(3)	0,9(2)
2	35,532(9)	2,5244(6)	3693(61)	0,416(11)	2514(22)	0,681(17)	1,02(11)
3	44,20(12)	2,048(5)	51(7)	3,7(8)	386(70)	0,8(2)	0,5(5)
4	48,189(14)	1,8868(5)	3217(57)	0,452(13)	2310(20)	0,718(19)	1,16(17)
5	63,91(5)	1,4554(10)	612(25)	0,52(6)	535(40)	0,87(10)	1,3(7)
6	65,77(2)	1,4188(5)	183(14)	0,58(9)	137(44)	0,7(3)	5(10)
7	72,98(3)	1,2953(4)	833(29)	0,55(3)	673(16)	0,81(5)	1,1(3)
8	75,26(4)	1,2616(5)	505(22)	0,57(7)	471(24)	0,93(9)	0,5(2)
9	76,96(3)	1,2379(4)	702(27)	0,55(3)	561(22)	0,80(6)	1,1(3)
10	83,90(5)	1,1523(5)	543(23)	0,59(8)	545(16)	1,00(7)	1,0(4)
11	98,55(7)	1,0164(5)	388(20)	0,74(6)	408(18)	1,05(10)	1,1(4)
12	107,98(8)	0,9523(5)	299(17)	0,90(17)	498(120)	1,7(5)	1,1(5)
13	109,60(8)	0,9426(5)	264(16)	1,0(2)	364(106)	1,4(5)	1,1(4)
14	117,00(6)	0,9034(3)	542(23)	1,03(6)	770(41)	1,42(14)	0,7(2)
15	120,72(6)	0,8863(3)	295(17)	0,85(14)	468(36)	1,6(2)	1,5(7)

Таблица 2. – Параметры пиков упрочненного АДУ образца твердого сплава ВК8

№	2 Θ , град.	d , Å	Высота (отсчеты)	FWHM (град.)	Высота	$B_{гр}$, град.	β , 10^{-3} рад.
1	31,439(17)	2,8431(15)	1288(36)	0,343(18)	676(13)	0,52(2)	1,0(2)
2	35,577(9)	2,5214(6)	4800(69)	0,356(10)	2803(21)	0,584(13)	0,95(11)
3	44,32(11)	2,042(5)	53(7)	3,0(7)	325(46)	0,62(17)	0,5(6)
4	48,265(10)	1,8840(4)	4130(64)	0,377(14)	2604(23)	0,631(15)	1,54(16)
5	63,92(4)	1,4553(9)	721(27)	0,51(3)	542(17)	0,75(5)	0,9(4)
6	65,69(2)	1,4203(4)	227(15)	0,41(6)	155(14)	0,68(11)	1,54(16)
7	72,97(2)	1,2954(3)	910(30)	0,50(3)	660(17)	0,72(4)	0,64(14)
8	75,33(6)	1,2605(8)	501(22)	0,56(7)	461(22)	0,92(8)	0,8(4)
9	76,94(2)	1,2381(3)	765(28)	0,50(3)	550(20)	0,72(5)	0,64(14)
10	83,91(4)	1,1522(4)	585(24)	0,54(6)	529(16)	0,90(7)	0,7(3)
11	98,64(3)	1,0157(2)	400(20)	0,65(6)	408(18)	1,02(10)	2,1(6)
12	108,03(10)	0,9519(6)	299(17)	0,90(14)	422(94)	1,4(4)	1,2(7)
13	109,71(4)	0,9420(2)	323(18)	0,84(17)	424(89)	1,3(3)	2,1(6)
14	117,13(7)	0,9028(3)	581(24)	1,02(6)	797(34)	1,37(12)	1,1(3)
15	120,74(9)	0,8861(4)	306(17)	0,90(14)	437(34)	1,43(19)	1,3(6)

По результатам рисунков 3-6 и данным таблиц 1, 2 приведены величины физического уширения дифракционных линий и значения величин изменений линий уширения в твердосплавных образцах сплава ВК8, стандартном и упрочненным методом АДУ, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3. – Величины физического уширения дифракционных линий и их изменений в твердосплавных образцах сплава ВК8, стандартном и упрочненным методом АДУ

Наименование сплава	№ замера	Величина физического уширения дифракционных линий β , рад.		Уменьшение линий уширения (плотности дислокаций), %
		стандартный	упрочненный АДУ	
ВК8	1	0,58	0,52	11,5
	2	0,68	0,58	17,2
	3	0,80	0,62	29,0
	4	0,72	0,63	14,3
	5	0,87	0,75	16,0
	6	0,70	0,68	2,9
	7	0,81	0,72	12,5
	8	0,93	0,92	12,2
	9	0,80	0,72	1,1
	10	1,00	0,90	11,1
	11	1,05	1,02	11,1
	12	1,70	1,4	2,9
	13	1,40	1,3	21,4
	14	1,42	1,37	7,7
	15	1,60	1,43	3,6
среднее значение				11,6

Из таблицы 3 видно, что при упрочнении методом АДУ в среднем происходит уменьшение уширения дифракционных линий на 11,6 %, а, следовательно, в связи с существующей корреляционной связью между уширением дифракционных линий и плотностью дислокаций при упрочнении методом АДУ происходит уменьшение плотности дислокаций в твердосплавных образцах сплава ВК8 на 11,6 %.

Определенные по формулам (1), (2) с учетом экспериментальных данных рентгенограмм (таблицы 1, 2) плотности дислокаций ρ_d для сплава ВК8 в виде графических зависимостей представлены на рисунке 7.

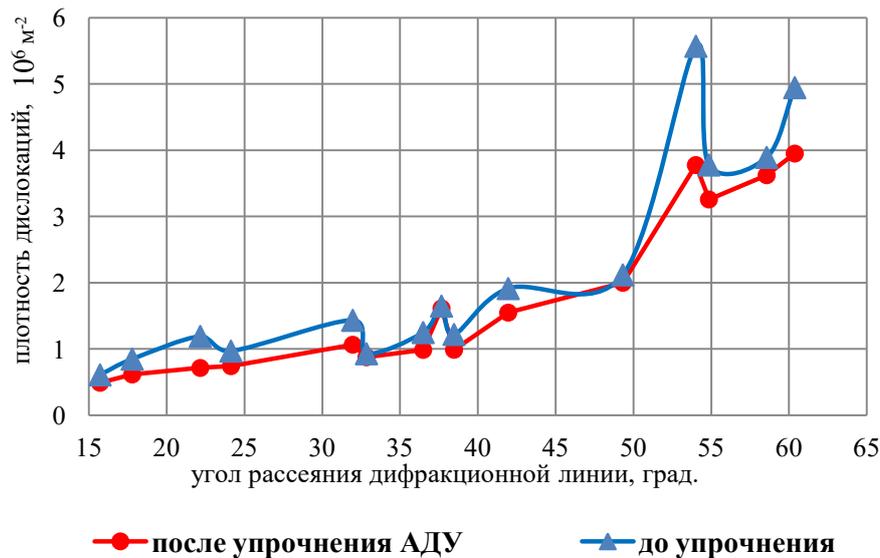


Рисунок 7. – Зависимость плотности дислокаций ρ_d от угла рассеяния дифракционной линии для твердого сплава ВК8

Определенные по формуле (1) с учетом данных рентгенограмм (таблицы 1, 2) значения плотностей дислокаций в кобальте Со твердого сплава ВК8, стандартного и упрочненного методом АДУ, представлены в таблице 4.

Таблица 4. – Плотность дислокаций в кобальте Со твердого сплава ВК8, стандартного и упрочненного методом АДУ

Наименование и номер карбидов		образца		Величины плотности дислокаций ρ_d , 10^6 м^{-2}	Уменьшение плотности дислокаций, %
Со	стандартный	1			
		2		8,184	
		3		10,263	
	упрочненный АДУ	1		8,193	16,9%
		2		7,478	
		3		4,765	

После исключения явно выбивающегося значения плотности дислокаций для образца упрочненного АДУ, по данным таблицы 4 среднее арифметическое уменьшение плотности дислокаций образца сплава ВК8, упрочненного методом АДУ, по сравнению со стандартным, составляет 16,9 %. В работе [7] также выявлено влияние энергетического воздействия на изменение плотности дислокаций.

Исследования распределения микротвердости по глубине твердосплавных образцов из сплава ВК8 (рисунок 8) показали, что с глубины свыше 0,7 мм изменений микротвердости в упрочненных методом АДУ образцах по сравнению со стандартным не наблюдается. В поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение поверхностной твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %. Хотя повышение твердости и находится в пределах заданной 5 % погрешности измерений, но в то же время такое повышение твердости стабильно наблюдается во всех проведенных исследованиях.

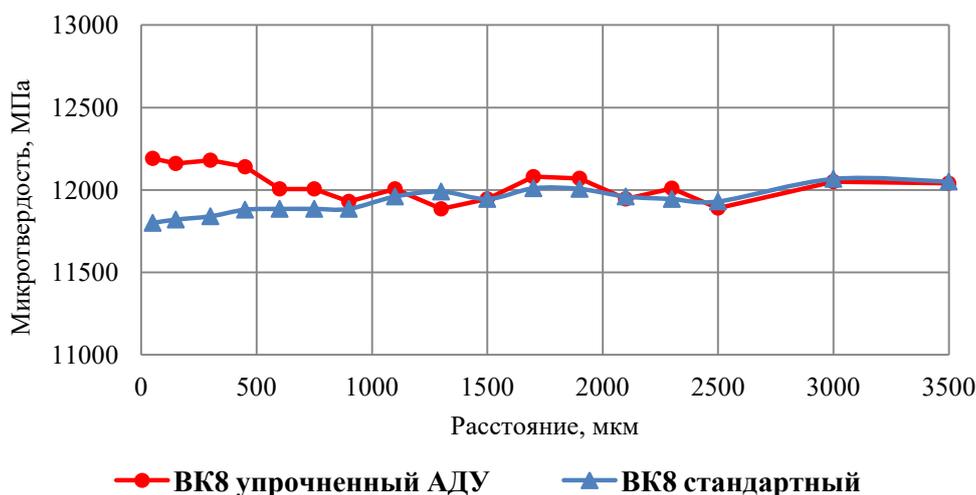


Рисунок 8. – Изменение микротвердости от вершины к сердцевине для стандартного и упрочненного методом АДУ твердого сплава ВК8

Выводы.

1. Экспериментально установлено, что в твердых сплавах ВК8, стандартных и упрочненных АДУ, четко прослеживается различие в структуре образцов. У стандартных образцов присутствуют в структуре сильно разориентированные зерна, их границы искажены, ряд зерен имеет размытые границы, в микроструктуре наблюдается большое число контуров экстинкции, что свидетельствует об искажениях кристаллической решетки и о наличии высоких внутренних напряжений. У упрочненных методом АДУ образцов контуры межзерновых границ четче выделены, имеют более явные очертания, эффект экстинкции присутствует в значительно меньшей степени, что указывает об уменьшении внутренних напряжений и снижении искажений в кристаллических решетках, на наличие невысокой плотности дислокаций.

2. Упрочнение методом АДУ приводит к снижению плотности дислокаций в твердых сплавах ВК8 и их компонентах по сравнению с неупрочненными: у твердых сплавов ВК8 на 11,6...13,3 %; в кобальте сплава ВК8 на 16,9 %.

3. Подтверждено, что при методе упрочнения АДУ не происходит снижения твердости во всем объеме сплава, в поверхностном слое до 0,7 мм наблюдается повышение поверхностной твердости по параметру HRC на 3,0...5,2 %.

Список использованных источников

1. Шелег, В.К. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из стали / В.К. Шелег, А.Н. Жигалов // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 56-65.

2. Жигалов, А.Н. Исследование влияния метода аэродинамического звукового упрочнения на износ твердосплавного инструмента при фрезерной обработке материала из чугуна / А.Н. Жигалов, А.А. Жолобов, В.К. Шелег // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 3 (64). – С. 36-47.
3. Анищак, В.М. Дифракционный анализ: учеб. пособие / В.М. Анищак, В.В. Понарядов, В.В. Углов. – Минск: Вышэйшая школа, 2011. – 215 с.
4. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
5. Кривоглаз, М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М.А. Кривоглаз. – Киев: Наукова думка, 1983. – 115 с.
6. Горелик, С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
7. Структурно-фазовое модифицирование инструментальных материалов тлеющим разрядом: монография / В.М. Шеменков [и др.]; под общ. ред. В.М. Шеменкова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 270 с.

Информация об авторах

Information about the authors

Жигалов Анатолий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Беларусь), e-mail: jigalov6@mail.ru.

Jigalov Anatoly Nikolaevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Baranovichi State University (21, Voykova Str., 225404, Baranovichi, Belarus), e-mail: jigalov6@mail.ru.

Богдан Дмитрий Дмитриевич – аспирант, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, г. Барановичи, Беларусь), e-mail: Dmitri_bogdan@tut.by.

Bogdan Dmitry Dmitrievich – Post-graduate Student, Baranovichi State University (21, Voykova Str., 225404, Baranovichi, Belarus), e-mail: Dmitri_bogdan@tut.by.

Поступила в редакцию 28.02.2020 г.

УДК 678.027.5:632.951

Лашкина Е.В.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ИНСЕКТИЦИДНАЯ ЗАЩИТНАЯ ПЛЕНКА, МОДИФИЦИРОВАННАЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ АКТИВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ**

Аннотация. Разработаны и изготовлены многофункциональные пленочные материалы состава ПЭВД/ДОФ/инсектицид/УФ-стабилизатор (Tinuvin 783), оптимизированные по рецептурным, структурным, физическим и физико-химическим параметрам и биоактивности. Введение в полимерную композицию стабилизатора из класса стерически затрудненных аминов позволяет получить новые композиционные полимерные пленки с дополнительными функциональными свойствами. Исследования методом ИК-спектроскопии показали, что в инсектицидных полимерных пленках имеет место образование эфирной связи между молекулами компонентов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, инсектициды, стерически затрудненные амины, инсектицидная активность.

Lashkina E.V.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***INSECTICIDAL PROTECTIVE FILM MODIFIED BY
FUNCTIONAL ACTIVE COMPONENTS**

Abstract. Multifunctional film materials of the composition LDPE/DOP/insecticide/UV stabilizer (Tinuvin 783), optimized according to formulation, structural, physical and physical-chemical parameters and bioactivity, have been developed and manufactured. Introduction of a stabilizer from a class of sterically hindered amines into the polymer composition enables to obtain new composite polymer films with additional functional properties. Studies by IR spectroscopy have shown that in insecticidal polymer films, the formation of an ether bond between the molecules of the components takes place.

Keywords: polymer composites, insecticides, sterically hindered amines, insecticidal activity.

Введение. Современные тенденции развития промышленного комплекса стран свидетельствуют об актуальности разработки новых многофункциональных инсектицидных полимерных материалов с заданным комплексом свойств.

Активные инсектицидные полимерные материалы должны одновременно обладать удовлетворительными деформационно-прочностными характеристиками и высокой инсектицидной активностью к биоагентам. Важным критерием, предъявляемым к таким материалам, является их экологическая безопасность по отношению к окружающей среде и человеку.

Одной из современных тенденций в области разработки способов защиты лесных, сельскохозяйственных угодий и декоративных насаждений в городах от насекомых-фитофагов, а также сырья и кератинсодержащих изделий от воздействий окружающей среды, механических и биоповреждений является их упаковка и/или укутывание с помощью многофункциональных инсектицидных полимерных пленок.

Такие материалы являются альтернативой традиционному опрыскиванию и позволяют значительно снизить риск негативного воздействия химически активных компонентов на функционирование биоценозов и экосистем, дополнительное загрязнение окружающей среды и высокие энергоматериальные затраты.

Способ защиты товарной продукции от насекомых-кератофагов – модифицирование бумажных носителей раствором инсектицида (бумажные мешки погружают в раствор инсектицида) [1]. Такой способ предполагает использование в качестве основного упаковочного материала бумаги, которая характеризуется низкими прочностью и влагостойкостью. Известна инсектицидная композиция с замедленным высвобождением активного вещества [2], содержащая летучий пиретроидный инсектицид, смешанный с раствором полимера.

Перспективным направлением в полимерном материаловедении является создание биологически активных полимерных композиционных материалов путем модифицирования полимерной матрицы химически активными реагентами (инсектицидами).

Современные инсектициды принадлежат к достаточно разнообразным классам химических веществ. Это инсектициды на основе синтетических пиретроидов, фосфорорганических соединений, неоникотиноидов [3], обладающие высокой инсектицидной активностью, продолжительным защитным действием при низких нормах расхода (1-5 %), эксплуатационными характеристиками ($T_{\text{разл.}}$ – 180-230 °С, $T_{\text{кип.}}$ – 120-286 °С), удовлетворяющими температуре переработки полимерной матрицы, экологической безопасности по отношению к окружающей среде [4].

В процессе переработки, при хранении и эксплуатации инсектицидные полимерные пленки подвергаются старению, что приводит к значительному изменению их свойств, поэтому большое значение приобретает проблема стабилизации этого процесса.

В качестве стабилизатора, повышающего стойкость полиэтиленового связующего к термоокислительной деструкции и действию УФ облучения, используют стерически затрудненные амины [5, 6], мировым лидером по производству которых является Швейцарская компания CIBA (BASF).

Цель работы – изучение влияния функциональных наполнителей на деформационно-прочностные характеристики, физико-химические и эксплуатационные свойства инсектицидных полимерных пленок.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования служили полимерные пленочные образцы инсектицидных полимерных составов на основе полиэтилена высокого давления (ПЭВД) марки 16803-070 (ГОСТ 16337-77).

В качестве активных компонентов в полимерных пленочных композиционных материалах ПЭВД были выбраны инсектициды различного спектра действия, широко распространенные на рынке Беларуси и стран СНГ. Их основные характеристики представлены в таблице 1.

Инсектициды пластифицировали диоктилфталатом (ДОФ) (ТУ 6-09-08-1504, ГОСТ 8728). В композициях использовали стабилизатор из класса стерически затрудненных аминов – белый порошок с желтоватым оттенком Tinuvin 783 (Richvin 783) (CIBA, Швейцария), представляющий собой синергичную смесь олигомерных напряженных аминных стабилизаторов Tinuvin 622 и Chimassorb 944 (1:1).

Tinuvin 783 является эффективным УФ стабилизатором с высокой устойчивостью к экстракции и низкой летучестью. Он термодинамически совместим с ПЭВД (интервал температур плавления 55-140 °С, точка вспышки 192 °С, плотность 514 г/л) [6], что обуславливает технологичность процесса получения пленки методом рукавно-пленочной экструзии.

Композиции с содержанием модифицирующих реагентов готовили смешением. Оценку совместимости компонентов и технологичность переработки композиций на их основе проводили с помощью экструзионного агрегата HAAKE RHEOCORD 90. Композиции выбранных составов перерабатывали в пленку методом рукавной экструзии при следующем соотношении компонентов, мас. %: ПЭВД – 92-96, ДОФ – 1-5, инсектицид – 0,5-3, Tinuvin 783 – 0,5-3.

Таблица 1. – Основные характеристики используемых инсектицидов

Класс инсектицида	Действующее вещество	Название (торговая марка), брутто-формула	Эмпирическая формула	ТУ
Неоникотиноид	имидаклоприд	«Искра Золотая» (ВРК) 4,5-дигидро-N-нитро-1- [(6-хлор-3-пиридил)метил] имидазолидин-2-иленамин	(C ₉ H ₁₀ Cl ₅ NO ₂)	2387-087- 42315284- 04
Синтетический пиретроид	β-циперметрин	«Кинмикс» (КЭ) α-циано-3-феноксibenзол-3- (2,2-дихлорвинил)- 2,2-диметил- циклопропанкарбоксилат	(C ₂₂ H ₁₉ Cl ₂ O ₃)	2441-061- 48811647- 2006
Фосфорорганический инсектицид	пиримифосметил	«Актеллик» (КЭ) 2-диэтиламино-6-метилпири- мидин-4-ил диметилфосфат	(C ₁₁ H ₂₀ N ₃ O ₃ PS)	2387-007- 00494172- 97

Деформационно-прочностные показатели пленок (разрушающее напряжение при растяжении σ и относительное удлинение ε при разрыве) определяли по ГОСТ 14236-81 с помощью разрывной машины Instron 5567 (США). Регистрировали изменение деформационно-прочностных характеристик в процессе старения пленок, подвергаемых УФ облучению по 8 ч/сут. в течение 3-х месяцев. Испытания проводили согласно методу, изложенному в ENISO 4892-2:2011 (Пластмасса. Методы испытаний на воздействие лабораторных источников света. Часть 2. Ксеноновые дуговые лампы).

Инсектицидное действие пленок изучали относительно платяной моли (*Tineola bisselliella*) и личинок комнатных мух (*Musca domestica*). Гусениц моли выращивали в чашках Петри на аграрсодержащих средах. Затем помещали в чашки образцы шерстяной ткани 3×3 см, которые были вложены в открытые конверты из исследуемой пленки. Через 30 суток регистрировали количество повреждений ткани p и бабочек n в чашках. Личинки мух (по 50 особей) помещали в бюксы на образцы исследуемых пленок. Спустя 5 ч регистрировали число m погибших личинок.

ИК-спектры образцов исследуемых материалов регистрировали в диапазоне волновых чисел 4000-400 см⁻¹ на ИК-Фурье спектрофотометре NICOLET 5700. Идентификацию и анализ полученных спектров осуществляли с использованием имеющихся данных по ИК-спектрам полимеров и органических соединений [7]. Морфологию поверхности инсектицидных пленочных образцов оценивали методом растровой электронной микроскопии с помощью оптического микроскопа Device.

Результаты и их обсуждение. Стабилизатор из группы стерически затрудненных аминов – Tinuvin 783 – хорошо совмещается с ПЭВД. Инсектицид, растворенный в пластификаторе, практически не связывается с макромолекулами, сохраняя молекулярную подвижность и способность к испарению. УФ излучение обуславливает радикально-цепной механизм фотоокисления ПЭВД.

Светостабилизатор нейтрализует образующиеся при фотоокислении макромолекулы радикалы с образованием ингибиторов окисления. Благодаря этому, еще более увеличивается подвижность молекул инсектицида в матрице ПЭВД, что ускоряет испарение и обуславливает повышенную концентрацию паров инсектицида вблизи поверхности пленки даже при малом содержании инсектицида в составе композиции. При этом, дозированное выделение паров из свободного объема полимерной матрицы продолжается до 5 лет, пока не израсходуется весь запас инсектицида.

По данным деформационно-прочностных показателей диапазон оптимальных концентраций ПЭВД соответствует 93-95 мас. % (таблица 2). При концентрации 92 мас. % (образец 1) прочность инсектицидной пленки заметно снижается. Увеличение ПЭВД до 96 мас. % приводит к снижению инсектицидности пленок, по-видимому, за счет большей степени связывания молекул инсектицида и макромолекул ПЭВД, тормозящего выделение паров инсектицида.

Таблица 2. – Изменение величины деформационно-прочностных характеристик модифицированных пленок в процессе светового старения

№ образцов	Компоненты и их содержание, мас. %						Показатели свойств пленок						
							инсектицидность			деформационно-прочностные характеристики σ (МПа)/ ε (%) после облучения в течение месяца			
	ПЭВД	ДОФ	«Искра Золотая»	«Кинмикс»	«Актеллик»	Tinuvin 783	<i>p</i>	<i>n</i>	<i>m</i> , %	0	1	2	3
1	92	4	2	-	-	2	0	0	100	8,4/400	8,2/380	7,9/370	7,9/370
2	93	3	2	-	-	2	0	0	100	8,6/400	8,3/380	8,1/370	8,1/370
3	95	2	2	-	-	1	0	0	100	8,6/400	8,4/380	8,2/380	8,1/370
4	96	2	1	-	-	1	8	4	90	8,7/380	8,4/380	8,3/380	8,1/370
5	93	5	1	-	-	1	0	0	100	8,5/380	8,3/380	8,0/370	8,0/370
6	95	1	2	-	-	2	5	2	95	8,6/390	8,4/380	8,3/380	8,1/370
7	95	3	0,5	-	-	1,5	10	5	85	8,6/380	8,3/380	8,1/370	8,1/370
8	93	3	3	-	-	1	0	0	100	8,6/380	8,2/370	8,1/380	8,0/370
9	95	3	1,5	-	-	0,5	8	5	88	8,6/390	7,6/370	6,2/330	5,5/310
10	93	2	2	-	-	3	0	0	100	8,6/390	8,3/390	8,1/380	8,1/370
11	94	3	-	1,5	-	1,5	0	0	100	8,6/390	8,3/380	8,3/380	8,0/370
12	94	3	-	-	1,5	1,5	0	0	100	8,5/380	8,3/380	8,3/380	8,0/370

Диапазон оптимальных концентраций ДОФ составляет 2-4 мас. %. Уменьшение содержания пластификатора ДОФ до 1 мас. % (образец 6) замедляет выделение инсектицида, что снижает инсектицидную активность пленки.

Снижение концентрации инсектицида до 0,5 мас. % (образец 7) резко ухудшает инсектицидность пленки, а увеличение содержания до 3 мас. % (образец 8) не дает выигрыша в эксплуатационных характеристиках пленки по сравнению с образцом 2. Оптимальная концентрация исследуемых инсектицидов («Искра Золотая», или «Кинмикс», или «Актеллик») в полимерных пленках составляет 2 мас. %.

Оптимальная концентрация стабилизатора Tinuvin 783 составляет 1-2 %. При концентрации 0,5 мас. % (образец 9) заметно ухудшается инсектицидность пленки, вероятно, вследствие нарушения синергетического соотношения концентраций Tinuvin 783/инсектицид.

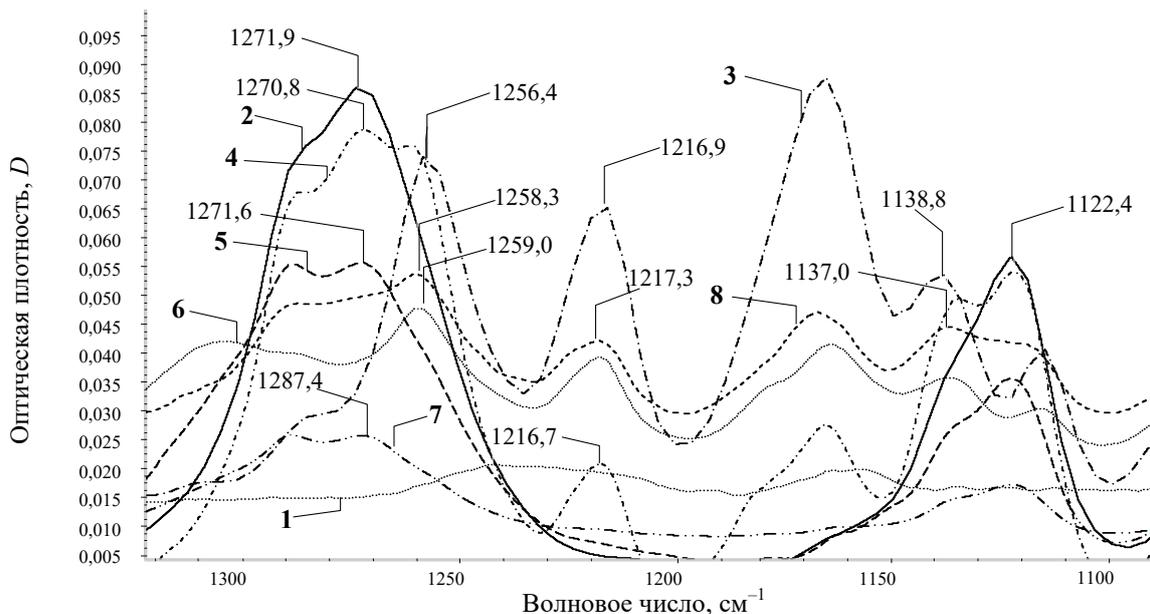
Оптимальные составы инсектицидных пленок соответствуют образцам № 2 и № 3. Это справедливо для всех исследованных инсектицидов (образец № 11, № 12).

С целью подтверждения физико-химических взаимодействий, протекающих в инсектицидных пленочных образцах, была изучена совместимость пластификатора ДОФ и инсектицидов «Кинмикс», «Искра Золотая», «Актеллик» методом ИК-спектроскопии (МНПВО), а также – сравнением спектров пропускания.

Сравнительный анализ фрагментов ИК-спектров на примере синтетического пиретроида «Кинмикс», бинарной композиции ДОФ/«Кинмикс», ПЭВД/«Кинмикс», ПЭВД/ДОФ и композиции ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 в области 1300-1100 см⁻¹

показал, что между компонентами композита происходят межфазные взаимодействия, что обусловлено присутствием валентных колебаний эфирных связей в структуре бинарной композиции ДОФ/«Кинмикс» и композиции состава ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 (рисунок).

Наличие интенсивной широкой полосы отражения композиции ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 в области $1258,3 \text{ см}^{-1}$ указывает на появление эфирной связи ($=\text{C}-\text{O}-\text{C}$), образующейся за счет физико-химических взаимодействий между молекулами ДОФ и «Кинмикс», что подтверждается вкладом бинарной композиции – ДОФ/«Кинмикс» ($1271,9 \text{ см}^{-1}$) в образовании связей в системе ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783.



1 – ПЭВД; 2 – ДОФ/«Кинмикс»; 3 – ДОФ; 4 – «Кинмикс»; 5 – ПЭВД/«Кинмикс»;
6 – ПЭВД/ДОФ; 7 – ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 (пропускание);
8 – ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 (МНПВО)

Рисунок. – Сравнительный анализ ИК-спектров модифицирующих реагентов в области $1300-1100 \text{ см}^{-1}$

Широкая полоса отражения композиции ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 в области $1137-1117 \text{ см}^{-1}$, описывающая эфирную связь, образуется за счет физико-химических взаимодействий в бинарной композиции ДОФ/«Кинмикс» ($1122,4 \text{ см}^{-1}$). А появление широкой полосы пропускания в области $1138-1119 \text{ см}^{-1}$ подтверждает вклад простой эфирной связи ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$), которая также образуется за счет бинарной композиции ДОФ/«Кинмикс» ($1122,4 \text{ см}^{-1}$) при взаимодействии инсектицида «Кинмикс» и пластификатора ДОФ.

С целью косвенного подтверждения протекания физико-химических реакций в структуре инсектицидной композиции ПЭВД/ДОФ/«Кинмикс»/Tinuvin 783 была оценена топография поверхности методом растровой электронной микроскопии.

Достаточно однородный рельеф поверхности инсектицидной полимерной пленки свидетельствует о равномерности распределения молекул модификаторов в полимерной матрице и их совместимости с полимерной матрицей в присутствии пластификатора вследствие межфазных взаимодействий между ними.

Выводы. Введение целевых добавок из классов синтетических пиретроидов («Кинмикс»), неоникатиноидов («Искра Золотая»), фосфорорганических соединений («Актеллик») и УФ-стабилизатора из класса стерически-затрудненных аминов (Tinuvin 783) в полимерную матрицу является эффективным способом модифицирова-

ния, что положительно влияет на деформационно-прочностные характеристики (высокий предел прочности при растяжении (~8,5 МПа)) многофункциональной инсектицидной полимерной пленки, обладающей высокой инсектицидной активностью к биоагентам, пролонгированным действием, стойкостью к воздействию УФ-лучей, длительным сроком эксплуатации.

Результаты ИК-спектроскопии и оптической микроскопии свидетельствуют о возможных физико-химических процессах и межфазных взаимодействиях между функциональными группами компонентов, протекающих при формировании композита.

Разработанная новая многофункциональная пленка может найти применение на предприятиях химической промышленности, выпускающих полимерную пленочную продукцию. Использование инсектицидной укрывной пленки пролонгированного действия позволит решить проблему защиты сельскохозяйственных угодий, лесных хвоелиственных насаждений от насекомых-фитофагов, а также снизить потери от биоповреждения упакованных в пленочные чехлы непродовольственных товаров.

Список использованных источников

1. Бумага, пропитанная инсектицидными действующими веществами: пат. 2450517 РФ, МПК А01N53/00, А01N25/20, А01P7/04 / Штефан Шюле, Бернхард Летцнер, Жоффри Аллс, Франсуа Акль; заявитель Байер КропСайенс АГ. – № 2008149431/13; заявл. 09.05.07; опубл. 20.05.12 // Официальный патентный бюллетень РФ «Изобретения. Полезные модели» / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2012. – № 14. – 4 с.

2. Инсектицидные композиции с замедленным высвобождением: пат. 2475026 RU, МПК А01N053/06, А01N053/02, А01N025/10, А01N025/02, А01P007/04 / Монсонис Гуэль Эдуард, Кортес Бареа Хорди; заявитель ЭС.СИ. ДЖОНСОН ЭНД САН, ИНК. (US). – № 2009146030/13; заявл. 23.04.08; опубл. 20.02.2013; приоритет 14.05.2007 EP. – 6 с.

3. Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь / А.В. Пискун [и др.] // Государственное учреждение «Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений». – Минск: ООО «Земледелие и защита растений», 2017. – 5 с.

4. Лашкина, Е.В. Диффузионные процессы в полиэтиленовых пленках, модифицированных инсектицидами / Е.В. Лашкина // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 3. – С. 86-93.

5. Стабилизатор для полиолефинов: пат. US 6869992, МПКС08К 5/34 / Gugumus Fran.cedilla.ois (Allschwil, CH); заявитель Ciba Specialty Chemicals Corporation (Tarrytown, NY). – Appl. No. 10/182,073; заявл. 23.07.02; опубл. 22.03.05.

6. Эштон, Генри Функциональные наполнители для пластмасс / Генри Эштон; под ред. М. Ксантоса. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 462 с.

7. Преч, Э. Определение строения органических соединений / Э. Преч, Ф. Бюльманн, К. Аффольтер. – М.: Мир, 2006. – 440 с.

Информация об авторе

Лашкина Елена Витальевна – старший преподаватель кафедры «Физика и химия», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: lashkina@mail.ru.

Information about the author

Lashkina Elena Vitalievna – Senior lecturer, “Physics and Chemistry” Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: lashkina@mail.ru.

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

УДК 66.061.18-026.78 (045)(476)

Неверов А.С., Доценко Е.И., Пантюхов О.Е.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ «ВОДА – ГЛИЦЕРИН – АЦЕТОН – ЭТИЛОВЫЙ СПИРТ»**

Аннотация. В статье приводятся результаты исследования физико-химических свойств четырехкомпонентной системы смесей растворителей «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт» в зависимости от их состава. Показано, что при определенном объемном соотношении компонентов смеси растворителей наблюдается эффект повышения кислотности смеси.

Ключевые слова: смесь, растворитель, кислотность, ацетализация.

Neverov A.S., Dotsenko E.I., Pantyukhov O.E.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF A FOUR-COMPONENT SYSTEM “WATER – GLYCERIN – ACETONE – ETHYL ALCOHOL”**

Abstract. The article presents the results of the study of physical and chemical properties of a four-component system of solvent mixtures “water – glycerin – acetone – ethyl alcohol” depending on their composition. It is shown that at a certain volume ratio of the components of the solvent mixture, the effect of increasing the acidity of the mixture is observed.

Keywords: mixture, solvent, acidity, acetalization.

Введение. Еще древние алхимики наряду с философским камнем искали универсальный растворитель. Сегодня мы знаем, что ни того ни другого создать невозможно, тем не менее, проблема создания растворителей для различных веществ продолжает занимать ученых. Среди громадного ассортимента известных растворителей можно выделить группу, наиболее распространенных и наиболее часто применяемых на практике. Это глицерин, ацетон и этиловый спирт. Их важной особенностью является хорошая совместимость с водой, которая по своим физико-химическим свойствам является растворителем, наиболее близким к универсальному. Каждый из вышеперечисленных растворителей имеет свою область применения. Иногда их используют в виде бинарных смесей (спирт – вода, глицерин – вода, вода – ацетон), и свойства таких смесей достаточно хорошо изучены. Однако в литературе отсутствуют сведения о свойствах смесей этих растворителей во всем диапазоне их сочетаний. Решить такую задачу можно построением четырехкомпонентных диаграмм «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт» для определения основных свойств таких смесей.

Целью настоящей работы явилось построение диаграмм состояния смесей четырех указанных выше растворителей с целью изучения зависимости некоторых физико-химических свойств таких смесевых растворителей от их состава (объект исследования).

Актуальность такого исследования обусловлена тем, что в настоящее время возможности индивидуальных растворителей практически исчерпаны, и, в большинстве случаев, на практике используют их смеси, выбор состава которых производится простым перебором вариантов сочетания их компонентов. Используя метод симплекс-решетчатого планирования для построения диаграмм состояния, можно получить информацию о данном свойстве смесевых растворителей во всем диапазоне концентраций его компонентов.

Экспериментальная часть. В работе исследовались физико-химические свойства смесевых растворителей с помощью различных методик. Поверхностное натяжение смеси измерялось с использованием стагмометрического метода определения и по краевому углу капли исследуемой жидкости, нанесенной на стеклянную поверхность. Реологические свойства смесей жидкостей изучались с помощью вискозиметра по времени протекания жидкостей через капилляр определенного сечения. Оптические свойства исследовались по измерению показателя преломления жидкостей с помощью рефрактометра. Электрохимические свойства смесевых растворителей определялись по величине водородного показателя, определяемого рН-метром.

Результаты исследований. Анализ результатов экспериментальных исследований физико-химических свойств смесевых растворителей, проведенный с помощью построения четырехкомпонентных диаграмм «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт», показал, что такие показатели как вязкость, поверхностное натяжение, показатель преломления смесей монотонно без экстремумов изменяются при изменении состава смесей. Наибольший интерес представило исследование зависимости водородного показателя (рН) смесей от их состава.

На рисунке 1 представлена четырехкомпонентная диаграмма «вода – глицерин – ацетон – этиловый спирт». На диаграмме проведены изолинии постоянного значения рН, цифры на диаграмме соответствуют численному значению рН.

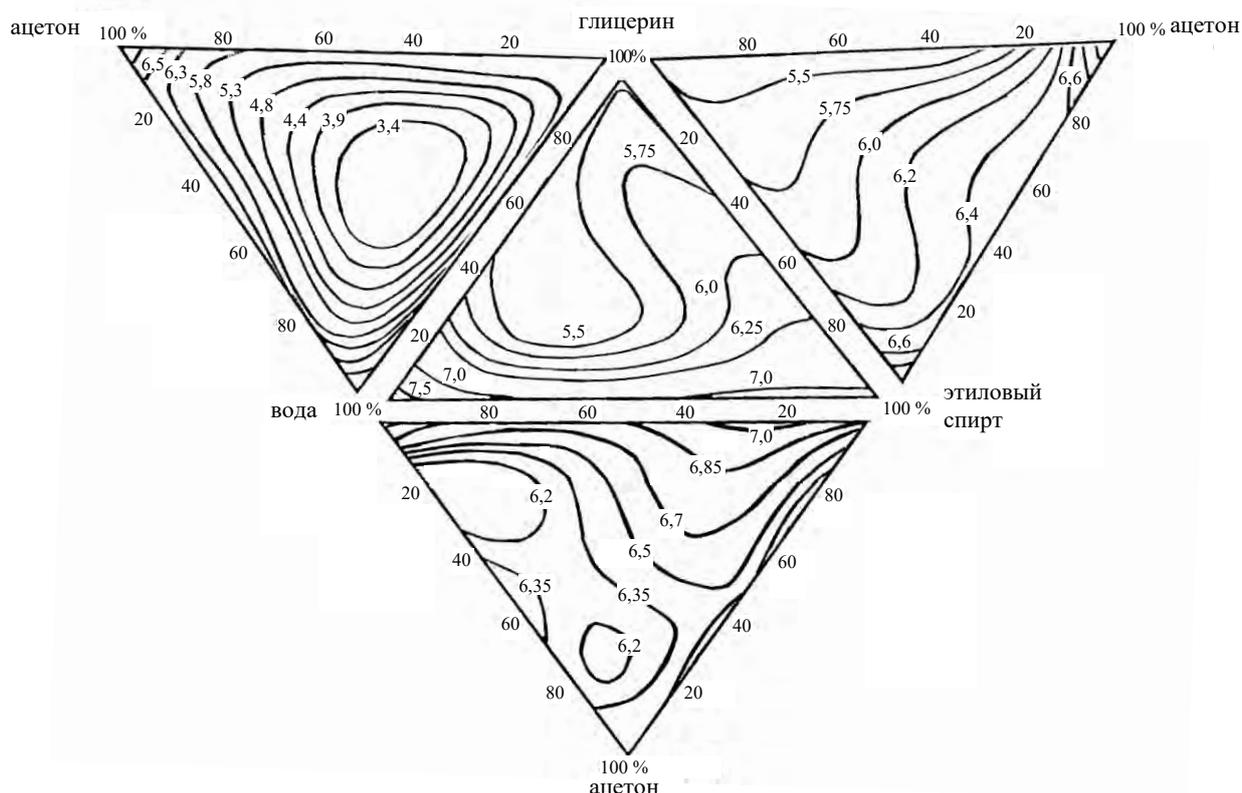


Рисунок 1. – Четырехкомпонентная система «глицерин – этиловый спирт – ацетон – вода»

На рисунке 2 показана схема нахождения концентраций композиции (объемный %) и направления обхода диаграмм. Компоненты смеси обозначены первыми буквами названий.

При изучении свойств четырехкомпонентной диаграммы, приведенной на рисунке 1, обращает внимание минимум значения водородного показателя на треугольной диаграмме «ацетон – глицерин – вода» при объемном соотношении этих компонентов смеси 1:2:2, соответственно.

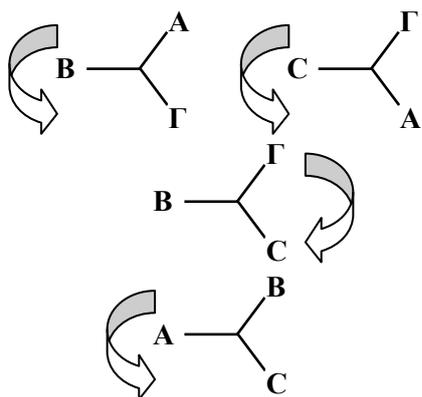
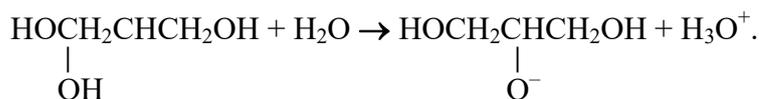


Рисунок 2. – Схема нахождения концентраций композиций и обхода диаграмм

проведены исследования оптимального состава, соответствующего минимуму рН, методом колебательной спектроскопии (рисунок 4). Помимо ожидаемых пиков поглощения в диапазоне частот, отвечающих наличию спиртовых групп ($1350...1600$, $3000...3600$ см^{-1}), карбоксиллов $\text{C}=\text{O}$ ($1650...1850$ см^{-1}) и колебаний основной углеводородной цепи $\text{C}-\text{C}$, $\text{C}-\text{H}$ ($700...1000$ см^{-1}), имеют место ярко выраженные пики поглощения в области $870...1310$ см^{-1} , отвечающей простым эфирам. Смещение области поглощения спиртовых групп в диапазон более низких частот ($3050...3400$ см^{-1}) свидетельствует о наличии большого числа водородных связей между компонентами систем [1].

В присутствии воды глицерин сравнительно легко (легче одноатомных спиртов и гликолей [2]) диссоциирует с отщеплением протона. При этом ионизируется средняя гидроксильная группа (влияние индуктивного эффекта двух соседних кислородных атомов [2]):



По-видимому, межмолекулярное взаимодействие (водородные связи) интенсифицирует этот процесс. В образующейся за счет отщепления протона кислой среде протекают следующие процессы взаимодействия трехатомного спирта и кетона [1, 2]:

Значение минимума в этой концентрационной области приблизительно в два раза меньше рН каждого из индивидуальных компонентов этой смеси. Рассмотрение других трехкомпонентных составляющих четырехкомпонентной системы показывает, что при замене на этиловый спирт любого из компонентов системы «ацетон – глицерин – вода» ярко выраженного минимума на треугольных диаграммах не наблюдается, и снижение рН не столь значительно.

Аналогичный экстремум в этой области имеет место на треугольной диаграмме «ацетон – глицерин – вода» при изучении краевого угла капли этой смеси на стеклянной поверхности (рисунок 3).

Для объяснения данного эффекта были

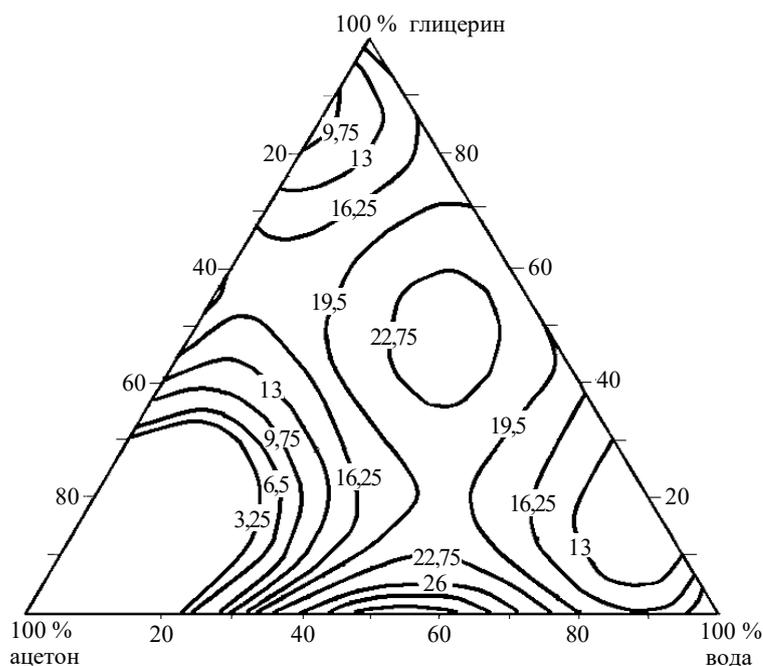


Рисунок 3. – Краевой угол капли смеси «ацетон – глицерин – вода» в зависимости от ее состава

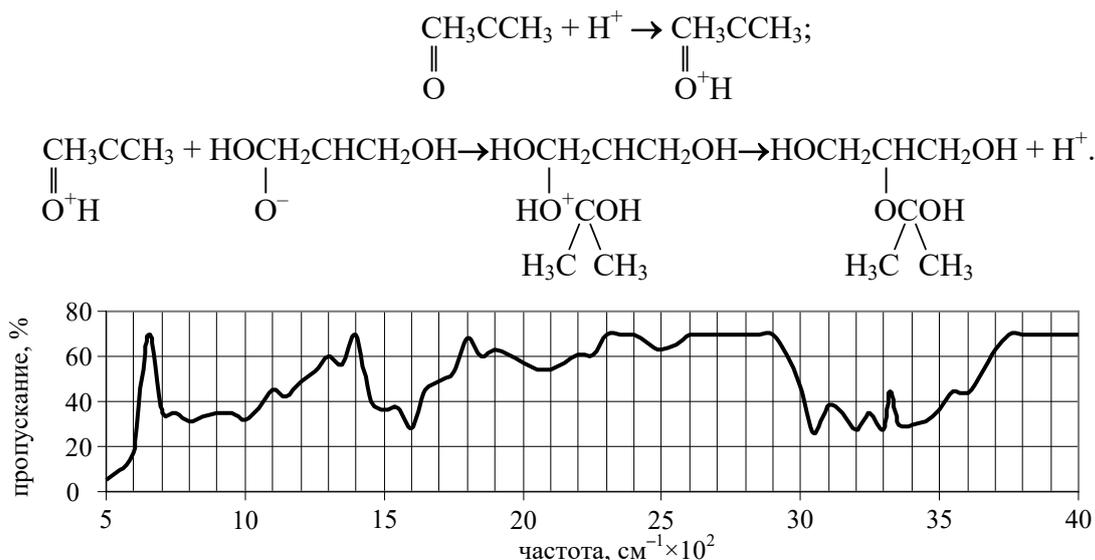


Рисунок 4. – ИК-спектр трехкомпонентной системы «ацетон – глицерин – вода» при соотношении компонентов по объему 1:2:2, соответственно

Наличие в образовавшемся полуацетале группировки $\text{R}_3\text{C}-\text{O}-\text{CR}_3$, характерной для простых эфиров, объясняет соответствующие пики поглощения на ИК-спектре [3]. Отщепление протона в процессе протекания этих реакций является дополнительным фактором, обуславливающим подкисление раствора. Вода и алканола являются слабыми нуклеофилами, поэтому реакция идет с карбонильными соединениями, активированными кислой средой [2], это объясняет отсутствие замеченного эффекта при замене глицерина на этиловый спирт, ионизация которого в водном растворе существенно ниже.

Обнаруженный эффект повышения кислотности смеси растворителей, обусловленный образованием простых эфиров, может иметь большое практическое значение.

Продукты взаимодействия спиртов с карбонильными соединениями – ацетали – представляют собой разновидность простых эфиров, которые широко используются в органическом синтезе. Удобный спирт для получения ацеталей – глицерин. В последнее время ацетали глицерина предлагаются в качестве добавок, улучшающих свойства моторных топлив [4]. Известно, что простые эфиры характеризуются слабым межмолекулярным взаимодействием, обуславливающим низкую полярность диалкиловых эфиров и отсутствие (в отличие от спиртов) предпосылок для образования водородных связей. Это является дополнительным подтверждением их образования при соотношении компонентов, отвечающем минимуму рН, так как этой же концентрационной области отвечает максимум значения краевого угла на рисунке 2, обусловленный образованием неполярного эфира и соответствующим снижением числа водородных связей, повышающих адгезию жидкости к стеклянной подложке. Простые эфиры во многих отношениях являются более предпочтительными компонентами топлив, чем спирты. Основные преимущества заключаются в более высокой окислительной стабильности, теплоте сгорания, более благоприятном межфазном распределении в системе «вода – топливо». Известно превращение глицерина в золькеталь (ацеталь глицерина и ацетона) при действии ацетона. Однако глицерин и ацетон плохо смешиваются, что создает определенные трудности в ацетализации глицерина ацетоном [5].

В трехкомпонентной системе «ацетон – глицерин – вода» межмолекулярное взаимодействие (водородные связи) интенсифицирует процесс диссоциации, а образующаяся в результате этого кислая среда способствует протеканию процесса ацетализации. При соотношении компонентов, отвечающем минимуму рН, система гомогенна, что также облегчает взаимодействие ацетона и глицерина.

Выводы. На основе анализа ИК-спектра трехкомпонентной системы «ацетон – глицерин – вода» при соотношении компонентов по объему 1:2:2, соответственно, сделан вывод о наличии большого числа водородных связей между компонентами системы, что объясняется тем, что в присутствии воды глицерин сравнительно легко диссоциирует с отщеплением протона. Этот процесс приводит к образованию кислой среды. Повышение кислотности среды, в свою очередь, способствует протеканию процесса ацетализации при взаимодействии ацетона и глицерина. Обнаруженный эффект повышения кислотности смеси растворителей, обусловленный образованием простых эфиров, может иметь большое практическое значение. Это позволяет упростить технологию получения добавок к моторным топливам на основе простых эфиров глицерина и ацетона.

Список использованных источников

1. Робертс, Дж. Основы органической химии: в 2 т. / Дж. Робертс, М. Касерио. – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 844 с.
2. Нейланд, О.Я. Органическая химия: учеб. для хим. специальностей вузов / О.Я. Нейланд. – М.: Высшая школа, 1990. – 751 с.
3. Беккер, Ю. Мир химии. Спектроскопия / Ю. Беккер. – М.: Мир, 2009. – 522 с.
4. Взаимодействие глицерина с ацетоном в присутствии этиленгликоля / Д.И. Рамзанов [и др.] // Нефтехимия. – 2015. – Т. 55, № 2. – С. 148-153.
5. Способ получения оксигената в качестве присадки к топливам, прежде всего дизельным топливам, бензинам и метиловому эфиру рапсового масла: пат. 2387702 РФ, МПК С10L1/18, С07D317/22 / М.А. Каусемакер, К.Д. Тиле; заявитель М.А. Каусемакер, К.Д. Тиле. – № 2006101723/04; заявл. 13.05.04; опубл. 27.04.10 // Официальный патентный бюллетень РФ «Изобретения. Полезные модели» / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2010. – № 12. – 8 с.

Информация об авторах

Неверов Александр Сергеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные технологии и конструкции», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: nev.aleksander2013@yandex.by.

Доценко Елена Иосифовна – старший преподаватель кафедры «Физика и химия», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: alena.dotsenko2012@yandex.by.

Пантюхов Олег Емельянович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные технологии и конструкции», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: PUJINE@TUT.BY.

Information about the authors

Neverov Aleksander Sergeevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department “Construction technologies and constructions”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: nev.aleksander2013@yandex.by.

Dotsenko Elena Iosifovna – Senior lecturer of the Department “Physics and chemistry”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: alena.dotsenko2012@yandex.by.

Pantyukhov Oleg Emelyanovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department “Construction technologies and constructions”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: PUJINE@TUT.BY.

Поступила в редакцию 25.11.2019 г.

УДК 621.793.16-022.532(476)

Овчинников Е.В.¹, Михайлов В.В.², Чекан Н.М.³, Пинчук Т.И.⁴¹УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», г. Гродно, Беларусь²Институт прикладной физики, г. Кишинев, Молдова³ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь⁴ГНУ «Институт порошковой металлургии им. академика О.В. Романа» НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Аннотация. Исследованы структура, физико-механические характеристики, удельная поверхностная энергия электроискровых покрытий, сформированных на металлических субстратах. Установлено, что условия формирования электроискровых покрытий оказывают существенное влияние на структуру получаемых защитных слоев. Структура покрытий также существенно зависит от химического состава электродов. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Показано изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования.

Ключевые слова: структура, морфология, покрытия, микротвердость, электроискровое легирование.

Auchynnikaŭ Ya.V.¹, Mikhailov V.V.², Chekan M.M.³, Pinchuk T.I.⁴¹Ya. Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus²Institute of Applied Physics, Chisinau, Moldova³Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus⁴Academician O.V. Roman Institute of powder metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

STRUCTURAL FEATURES OF NANOCOMPOSITION COATINGS OBTAINED BY THE ELECTROSPARK METHOD

Abstract. The structures, physical and mechanical characteristics, the specific surface energy of the electrospark coatings formed on metal substrates are studied. It has been established that the conditions for the formation of electrospark coatings have a significant effect on the structure of the resulting protective layers. Coating structure also significantly depends on the chemical composition of the electrodes. The possibility of the formation of MAX-phases in the coatings under study is observed. The change in the dependence of the specific surface energy values on the coating composition and technological modes of formation is shown.

Keywords: structure, morphology, coating, micro hardness, electrospark alloying.

Введение. Свойства поверхностных слоев оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики различного типа материалов. В связи с этим одной из приоритетных задач в области инженерии поверхности является разработка и улучшение существующих новых композиционных соединений, легирование металлических, интерметаллических покрытий различными по своей структуре, химическому составу элементами с целью достижения высоких антифрикционных, коррозионных и других функциональных характеристик. Особое место при получении данных покрытий занимает их экологичность, использование недорогих и широко распространенных материалов.

Согласно имеющимся литературным данным, технологию поверхностного упрочнения можно классифицировать шестью основными группами в зависимости от методологии модифицирования матрицы покрытия и поверхностных слоев субстрата:

- 1 – образование тонкослойных покрытий на поверхности твердых тел;
- 2 – модифицирование структуры и химического состава поверхностных слоев высокоэнергетическим воздействием;
- 3 – применение процесса трения для модифицирования поверхностных слоев изделий;
- 4 – поверхностно-объемная термообработка материалов, приводящая к изменению структуры и свойств деталей;
- 5 – криогенное модифицирование изделий;
- 6 – сочетание выше перечисленных методов.

Значительные достижения по формированию электроискровых покрытий достигнуты при применении фундаментальных исследований в области механизма электроискровых реакций и кинетики процесса, проведенных с учетом роли комплексообразования и других физико-химических явлений в системах, связанных с электроискровым легированием [1, 2].

Согласно устоявшимся представлениям, поверхностные слои электродов подвергаются местному воздействию высоких температур, давлению и ударной волны. В результате данного воздействия внешних факторов происходит локальный быстрый разогрев анода до высоких температур порядка 10^3 - 10^4 К. Время действия искрового разряда продолжается 40-600 микросекунд. Одной особенностью данного электрического разряда является его протекание в малых, фактически микроскопических, объемах. В результате данных явлений на поверхности отрицательно заряженного электрода образуются эрозионные углубления, каверны, в которых происходит взаимодействие частиц анода, катода и внешней среды, что приводит к формированию новых многокомпонентных фаз, образованию ультрадисперсных и наноразмерных частиц [3, 4].

Формирование нанофаз и наночастиц приводит к существенному изменению физико-механических характеристик как металлических, так и неметаллических материалов и покрытий [5, 6].

Согласно имеющимся данным, введение наночастиц металлов в полимерную матрицу приводит к формированию металлополимеров – нанокомпозитов, в составе которых преобладающее модифицирующее действие оказывают наночастицы металлов и оксидов [7]. Металлополимерные нанокомпозиционные материалы, полученные в результате термолиза металлосодержащих прекурсоров в расплаве матричного связующего, представляют особый класс композитов, отличающихся по структуре и служебным характеристикам от традиционных смесевых композиций. Современные методы физико-химического анализа показывают, что на границе раздела «наночастица металла – полимерная матрица», «наночастица металла – металлическая матрица», «наночастица металла – керамическая матрица» и т.д. протекают межфазные процессы, интенсивность которых зависит от параметров эксплуатационных факторов и определяет деформационно-прочностные, триботехнические, теплофизические и др. служебные характеристики изделий [7].

Методика исследований. Объектом исследований являлись композиционные покрытия, формируемые на стальном (40Х13) и титановом (ВТ6) субстрате. Режимы формирования покрытий, составы электродов приведены в таблице 1.

Особенности строения граничных слоев в композиционных материалах функционального назначения исследовали с привлечением современных методов: растровой электронной, атомно-силовой микроскопии, рентгеноструктурного анализа (ДРОН-3.0) по стандартным методикам.

Таблица 1. – Технологические параметры формирования покрытий электроискровым легированием (ЭИЛ) и состав электродов

Режим формирования покрытия, Дж	ВТ6 (субстрат)			
	образец № 1	образец № 2	образец № 3	образец № 4
0,9	Ti + Al + C	-	Ti + Si + C	-
3	-	Ti + Al + C	-	Ti + Si + C

Рентгеноструктурный анализ применяли для определения структуры электроискровых покрытий. Рентгенограммы получали на рентгеновском дифрактометре общего назначения марки ДРОН-3.0, используя излучение линии K_α от трубки с медным антикатодом, фильтрованное на длине волны $\lambda = 1,541 \text{ \AA}$. Межплоскостное расстояние кристаллографических областей определяли по формуле Вульфа-Брэгга:

$$2d \sin \Theta = n\lambda, \quad (1)$$

где d – межплоскостное расстояние, мкм;

Θ – брэгговский угол рассеяния;

$n = 1, 2, 3, \dots$;

λ – длина волны, мкм.

Средний размер кристаллитов L рассчитывали по формуле Шеррера [8]:

$$L = \frac{\lambda}{\Delta} \cos Q, \quad (2)$$

где Δ – полуширина максимума;

Q – угловое положение максимума.

Для более детального изучения структурных изменений в полимерах при введении наполнителей исследовали характер корреляционных функций $W(r)$, связанных с функциями радиального распределения атомной плотности $4\pi r^2 \rho(r)$ условием, вытекающим из формулы Цернике-Принса:

$$W(r) = 4\pi r^2 \rho(r) - 4\pi r^2 \rho_{av} = 8\pi r \int \frac{I_o(S) - S f_k^2(S)}{\sum_k f_k^2(S)} S \sin(2\pi r S) dS, \quad (3)$$

где r – модуль межатомного вектора (радиус координационной сферы);

ρ_{av} – средняя атомная плотность;

$\rho(r)$ – электронная плотность на сфере радиуса r ;

$I_o(S)$ – нормированная интенсивность рассеянного рентгеновского излучения;

S – вектор обратного пространства;

f_k^2 – структурный фактор k -го атома.

Определяли по рентгенограмме угловое положение рефлекса 2Θ , интенсивность рефлекса I , отношение I_m/I , где I_m – максимальный рефлекс на рентгенограмме. Для измерения микротвердости покрытий, сформированных на металлах, использовали микротвердомер НВММТ-Х7. Принцип действия прибора основан на изменении линейной величины диагонали отпечатка c , полученного от вдавливания алмазной пирамиды в исследуемый материал под определенной нагрузкой. Морфологию покрытий исследовали на растровом электронном микроскопе «MIRA3 TESCAN».

Результаты исследований. На рисунках 1-5 представлены рентгенограммы исследуемых электроискровых покрытий (нумерация согласно данным таблицы 1).

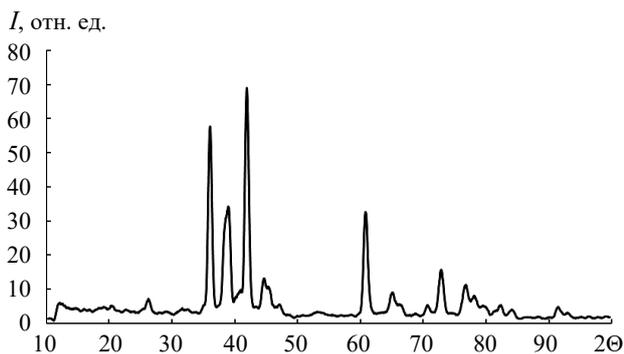


Рисунок 1. – Рентгенограмма образца № 1

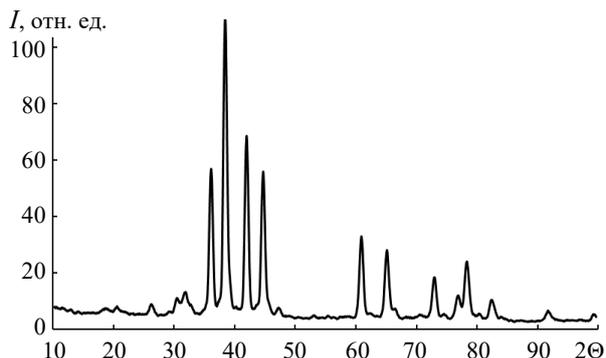


Рисунок 2. – Рентгенограмма образца № 2

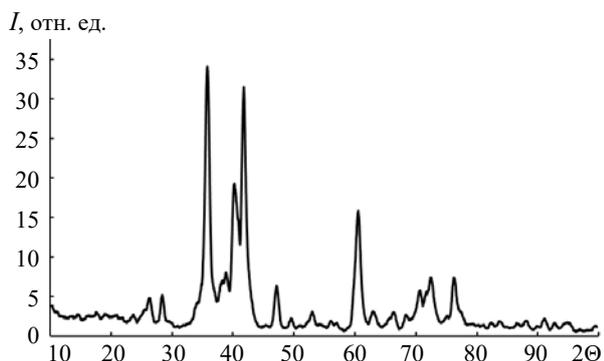


Рисунок 3. – Рентгенограмма образца № 3

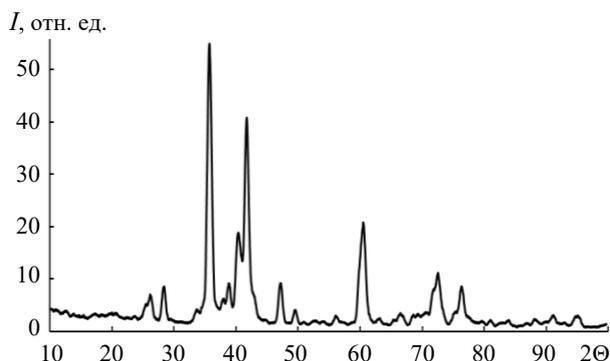


Рисунок 4. – Рентгенограмма образца № 4

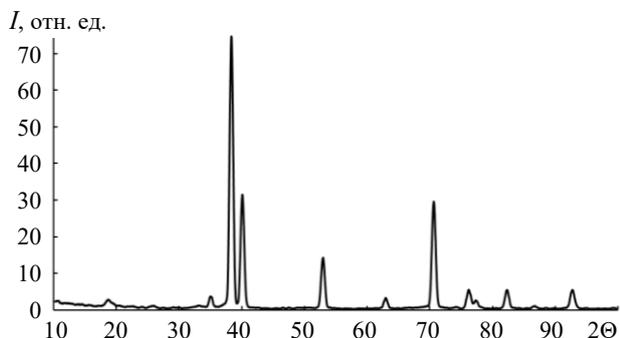


Рисунок 5. – Рентгенограмма субстрата ВТ6

Результаты расчетов рентгенограмм исследуемых образцов приведены в таблице 2.

Исходя из полученных данных видно, что в результате электроискрового получения покрытий структура исходных материалов претерпевает существенные изменения. Образуются многокомпонентные покрытия, причем режимы формирования оказывают существенное влияние на структуру получаемых покрытий.

Таблица 2. – Результаты расчетов межплоскостного расстояния для многокомпонентных покрытий, сформированных методом ЭИЛ

№ реф-лекса	субстрат, ВТ6		образец № 1		образец № 2		образец № 3		образец № 4	
	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I	d/n	I
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	4,702	2,61	4,665	4,90	5,031	5,05	3,76	2,7	3,76	4,86
2	2,559	3,69	4,352	5,22	4,627	5,49	3,39	4,75	3,39	6,86
3	2,344	74,75	3,956	3,83	4,344	5,31	3,13	5,14	3,13	8,4
4	2,245	31,39	3,393	7,24	4,058	4,56	2,51	33,59	2,51	4,13
5	1,727	14,26	2,831	4,18	3,371	7,47	2,35	7,00	2,35	54,68
6	1,474	3,16	2,758	4,23	2,810	5,18	2,31	7,85	2,31	6,13
7	1,332	29,50	2,487	57,45	2,488	64,84	2,24	19,16	2,24	9,11
8	1,247	5,36	2,308	34,18	2,332	37,06	2,16	31,45	2,16	18,77

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
9	1,232	2,59	2,152	68,71	2,236	8,15	1,92	6,09	1,92	40,16
10	1,170	5,44	2,029	13,19	2,154	77,11	1,83	2,21	1,83	9,13
11	1,122	1,08	1,994	10,34	2,027	17,11	1,72	3,10	1,72	4,01
12	1,103	0,53	1,927	5,6	1,994	11,24	1,63	1,90	1,63	2,82
13	1,064	5,39	1,720	3,39	1,928	7,07	1,60	1,68	1,60	20,59
14			1,521	32,62	1,725	3,10	1,52	15,86	1,52	2,46
15			1,516	26,13	1,703	3,15	1,47	3,03	1,47	2,18
16			1,432	8,98	1,668	3,44	1,42	2,32	1,42	3,46
17			1,408	5,59	1,521	35,03	1,41	3,02	1,41	3,14
18			1,361	2,98	1,472	3,27	1,37	2,71	1,37	3,31
19			1,331	5,42	1,431	10,34	1,33	5,75	1,33	8,04
20			1,297	15,75	1,405	6,21	1,30	7,42	1,30	10,98
21			1,239	11,06	1,381	2,88	1,26	2,54	1,26	3,72
22			1,222	8,06	1,363	3,37	1,25	7,26	1,25	8,41
23			1,202	5,16	1,329	5,03	1,17	1,66	1,17	2,09
24			1,168	5,06	1,298	18,11	1,15	1,83	1,15	2,04
25			1,148	3,86	1,242	12,06	1,12	1,65	1,12	1,51
26			1,075	4,86	1,223	9,04	1,10	1,91	1,10	2,27
27			1,062	92,98	1,204	5,13	1,09	1,31	1,09	1,81
28					1,171	5,86	1,07	2,18	1,07	3,03
29					1,180	4,13	1,06	1,66	1,06	1,66
30					1,070	4,90	1,04	1,79	1,04	2,93
31					1,060	2,72				

Проведен расчет размеров кристаллических образований, образующихся в покрытиях ЭИЛ (таблица 3).

Таблица 3. – Размеры кристаллических образований, образующихся в покрытиях ЭИЛ

Средний размер кристаллитов	ВТ6	образец № 1	образец № 2	образец № 3	образец № 4
$L, \text{Å}$	61	58,5	58	50,8	60,5

Согласно полученным данным (таблица 3), кристаллические образования в исследуемых материалах находятся в нанодиапазоне 50-61 Å [5-7], что позволяет предположить о формировании наночастиц и нанофаз в покрытиях, формируемых методом ЭИЛ. Установлено, что химические составы покрытий и режимы формирования оказывают существенное влияние на геометрические размеры образуемых кристаллических фаз в ЭИЛ покрытиях. В результате быстропротекающих процессов формирования покрытий возможно образование аморфной фазы в структуре покрытий. Расчет степени кристалличности исследуемых образцов показал, что данный параметр также зависит от технологических факторов получения покрытий (таблица 4).

Таблица 4. – Степень кристалличности исследуемых образцов

Степень кристалличности	ВТ6	образец № 1	образец № 2	образец № 3	образец № 4
$\omega, \%$	95	87	90	88	92

Условия формирования покрытий могут также приводить к изменению в аморфной составляющей получаемых покрытий. Введение функционализированных частиц нанодисперсного алмаза приводит к существенным изменениям в аморфной части формируемых соединений (таблица 5). Для оценки изменений атомных координаций были использованы относительные координационные числа (ОКЧ), (число атомов в первой координационной сфере образца № 1 принято за 100 %), т.е. ОКЧ соответствующей координационной сферы – это процентное отношение числа атомов в ней к числу атомов в сфере радиусом, равным радиусу первой координационной сферы контрольного образца (таблица 5).

Таблица 5. – Зависимость относительного координационного числа ΔS от условий и химического состава ЭИЛ покрытий

Параметры	образец № 1	образец № 2	образец № 3	образец № 4
ΔS	1	1,11	1,15	0,98
радиус координационной сферы r , Å	2,97	2,96	2,95	2,98

Из таблицы видно, что в ряде случаев происходит увеличение значений ОКЧ до 1,15. По-видимому, это связано с появлением в аморфной матрице покрытия областей молекулярного упорядочения.

Структура полученных покрытий оказывает существенное влияние на значения поверхностной энергии (рисунок 6).

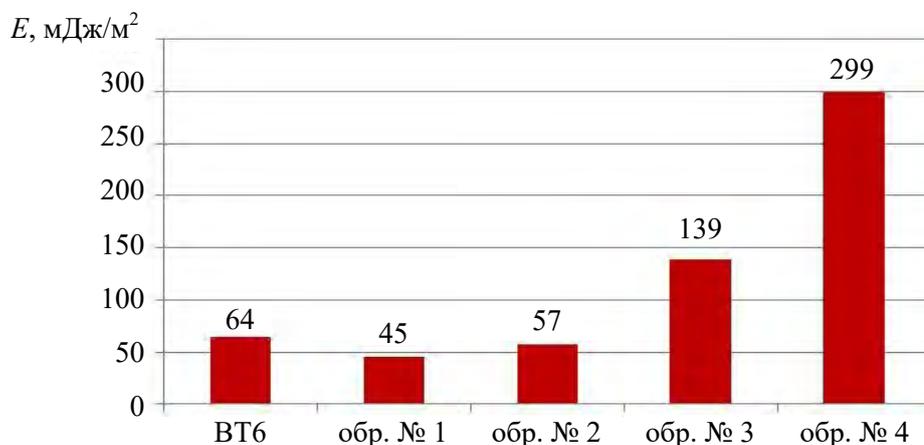


Рисунок 6. – Зависимость значений удельной поверхностной энергии E от режимов формирования электрохромных покрытий

Изучение морфологии электрохромных покрытий методом растровой электронной микроскопии показало наличие нанодисперсных фаз независимо от режимов и химического состава покрытий (рисунок 7).

Изменения в структуре, морфологии покрытий должны отражаться на физико-механических характеристиках покрытий. Проведенный анализ механических свойств электрохромных слоев, сформированных на титановом субстрате VT6, подтвердил данные предположения. Микротвердость исследуемых покрытий в 1,5-3 раза выше, чем у титанового субстрата.

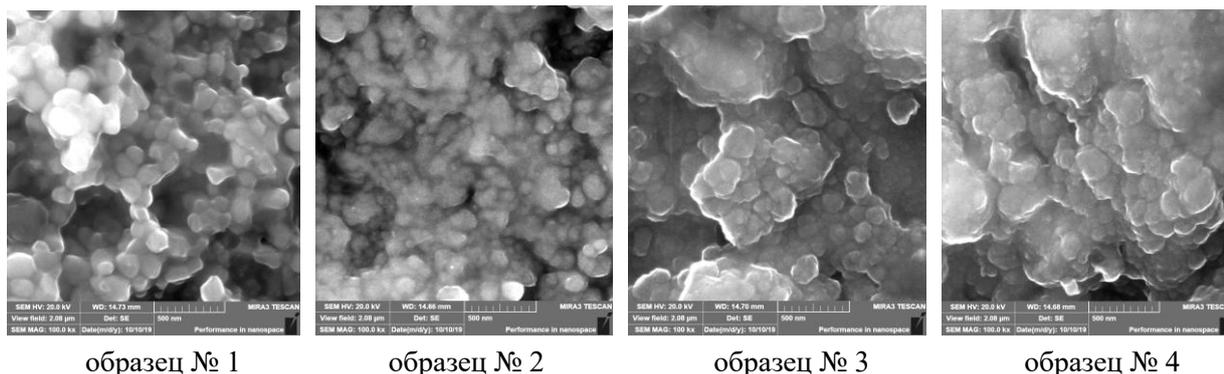


Рисунок 7. – Морфология электроискровых покрытий.
Снимки получены методом растровой электронной микроскопии

Заключение. Таким образом, показано, что условия формирования электроискровых покрытий оказывают существенное влияние на структуру получаемых защитных слоев. Структура покрытий также существенно зависит от химического состава электродов. Наблюдается возможность формирования МАХ-фаз в исследуемых покрытиях. Установлено изменение зависимости значений удельной поверхностной энергии от состава покрытия и технологических режимов формирования. Для всех исследуемых типов покрытий наблюдается образование нанодисперсных систем в структуре покрытия. Изменения в структуре, физических параметрах получаемых покрытий положительно сказываются на прочностных характеристиках, что выражается в увеличении значений микротвердости изучаемых покрытий в 1,5-3 раза.

Список использованных источников

1. Лазаренко, Б.Р. Электроискровая обработка токопроводящих материалов / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 183 с.
2. Лазаренко, Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 46 с.
3. Лазаренко, Б.Р. Динамическая теория выброса материала электрода коротким электрическим импульсом и закономерности образования ударных кратеров / Б.Р. Лазаренко, Д.И. Городецкий, К.Я. Краснолоб // *Электронная обработка материалов*. – 1969. – № 2. – С. 18-23.
4. Верхотуров, А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров // *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. – 1983. – № 1. – С. 3-6.
5. Витязь, П.А. Нанокристаллические алмазы и перспективы их использования / П.А. Витязь // *Наноструктурные материалы: получение и свойства*. – Минск: НАНБ, 2000. – С. 8-20.
6. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь [и др.]; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларуская навука, 2013. – 381 с.
7. Металлополимерные наноконпозиты: особенности структуры, технология, применение / А.А. Рыскулов [и др.]; под научн. ред. В.А. Струка, В.А. Лиопо. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 335 с.
8. Кристаллография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.

Информация об авторах

Овчинников Евгений Витальевич – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры логистики и методов управления, УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: mail@grsu.by.

Михайлов Валентин Владимирович – доктор наук, научный сотрудник, доцент, Лаборатория электрофизических и электрохимических методов обработки материалов им. Б. Лазаренко, Институт прикладной физики (ул. Академии, 5, г. Кишинев, MD-2028, Молдова), e-mail: director@phys.asm.md.

Чекан Николай Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов, ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси» (ул. Купревича, 10, 220141, г. Минск, Беларусь), e-mail: phti@belhost.by.

Пинчук Татьяна Иосифовна – научный сотрудник ГНУ «Институт порошковой металлургии им. академика О.В. Романа» НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, г. Минск, Беларусь), e-mail: alexil@mail.belpak.by.

Information about the authors

Auchynnikaŭ Yauheni – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of logistics and management methods, Ya. Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: mail@grsu.by.

Mikhailov Valentin – D. Sc., Researcher, Associate Professor, B. Lazarenko Laboratory of Electrophysical and Electrochemical Material Treatment Methods, Institute of Applied Physics (5, Academiei Str., Chisinau, MD-2028, Moldova), e-mail: director@phys.asm.md.

Chekan Mikalai – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Nanomaterials and ion-plasma processes, Physico-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Belarus), e-mail: phti@belhost.by.

Pinchuk Tatyana – researcher, Academician O.V. Roman Institute of powder metallurgy of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Belarus), e-mail: alexil@mail.belpak.by.

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

УДК 622.363:622.647.2

Антонов А.С.¹, Струк В.А.¹, Авдейчик С.В.², Абдуразаков А.А.³¹УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», г. Гродно, Беларусь²ООО «Молдер», г. Гродно Беларусь³Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог, г. Ташкент, Узбекистан

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. Проведен анализ материаловедческих и конструктивных подходов к созданию элементов ленточных конвейеров повышенного ресурса. Показана перспективность использования композиционных материалов на основе термопластов для изготовления металлополимерных роликов, используемых в различных отраслях промышленности. Предложены методологические принципы модифицирования термопластичных матриц с целью повышения параметров эксплуатационных характеристик изделий из них.

Ключевые слова: ленточный конвейер, металлополимерный ролик, композиционный материал, структура, многоуровневое модифицирование.

Antonov A.S.¹, Struk V.A.¹, Avdeychik S.V.², Abdurazakov A.A.³¹Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus²LLC "Molder", Grodno, Belarus³Tashkent Institute of design, construction and maintenance of automobile roads, Tashkent, Uzbekistan

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF MODIFYING THERMOPLASTIC MATRICES WITH A VIEW TO INCREASING THE PARAMETERS OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Abstract. The analysis of materials science and design approaches to the creation of elements of belt conveyors with high service life is carried out. The prospect of using composite materials based on thermoplastics for the manufacture of metal-polymer rollers used in various industries is shown. Methodological principles of modifying thermoplastic matrices with a view to increasing the parameters of performance characteristics of products made of them are proposed.

Keywords: belt conveyor, metal-polymer roller, composite material, structure, multi-level modification.

Введение. В технологических процессах добычи, переработки и применения сырьевых материалов различного состава, строения и агрегатного состояния широко применяют ленточные конвейеры. Их использование на предприятиях строительной индустрии, дорожного строительства, горнодобывающей, перерабатывающей, химической промышленности и энергетического комплекса позволяет оптимизировать технологические процессы, повысить производительность производства и обеспечить высокий уровень автоматизации и безопасности производимых работ [1-3].

Практический опыт эксплуатации ленточных конвейеров различного конструктивного исполнения указывает на наличие ряда проблем, решение которых позволит повысить эффективность их применения при одновременном снижении экономических затрат на изготовление и эксплуатацию, что, несомненно, приведет к повышению эффективности и безопасности производственных процессов.

Одним из основных конструктивных элементов ленточных конвейеров являются ролики, обеспечивающие движение ленты с различными видами сыпучих материалов. Технические параметры роликов (конструктивное исполнение, материалы, стойкость к изнашиванию и др.) определяют, в значительной мере, ресурс ленточного конвейера, затраты на его ремонт и обслуживание. Суммарная стоимость роликов составляет 25-30 % стоимости конвейера и до 40 % затрат связано с их ремонтом и обслуживанием.

Для выбора ролика при проектировании конвейера необходимо учесть величину и характер нагрузок, ширину ленты и скорость ее движения, режим работы конвейера, свойства транспортируемого груза, требуемую долговечность подшипников и совокупность изнашивающих факторов. Однако учет всех факторов затруднен, поэтому типоразмер роликов обычно выбирают по параметру допустимой нагрузки, которую определяют, исходя из действующей нагрузки на ролик, с учетом заданного ресурса подшипников, особенностей условий эксплуатации конвейера и размеров кусков породы. При неадекватном определении действующей нагрузки выбранный ролик может иметь или недостаточную, или завышенную долговечность, что экономически нецелесообразно. Поэтому правильная оценка величины действующих нагрузок при перемещении крупнокусковой породы и строительных материалов представляет собой актуальную задачу [2].

Широкое применение ленточных конвейеров, все возрастающие требования к их надежности, разнообразие условий эксплуатации и режимов работы обуславливают актуальность исследований, направленных на повышение долговечности элементов конвейеров. Важное практическое значение имеют разработка высокоэффективных композиционных материалов, конструкций и методов расчета стыковых соединений конвейерной ленты, обеспечение надежности барабанов, определение нагрузок на ролики опор линейных магистральных конвейеров, транспортирующих различные насыпные продукты, в том числе содержащие крупные фракции.

Анализ исследований, посвященных проблеме повышения эксплуатационного ресурса ленточных конвейеров, свидетельствует о превалировании преимущественно расчетно-аналитических и конструктивных подходов, без учета особенностей эксплуатации, обуславливающих коррозионное повреждение, абразивное и усталостное изнашивание элементов конструкции, определяющих совокупный ресурс системы [3].

Очевидно, что обоснованный выбор функциональных материалов для обеспечения оптимальных условий эксплуатации ленточных конвейеров должен быть осуществлен, исходя из результатов системного анализа, включающего конструкционные, деформационно-прочностные, коррозионно-механические, материаловедческие, экономические и технологические аспекты создания и эксплуатации.

Результаты исследований. Эксплуатация ленточных конвейеров в различных отраслях промышленности сопровождается воздействием ряда факторов, характеризующих особенности действующего процесса, который определяет механизмы изнашивания и сроки осуществления планового и предупредительного обслуживания и ремонта. Наиболее характерными видами изнашивания роликов являются коррозионно-механический и абразивный, интенсивность протекания которых зависит от условий эксплуатации – нагрузочно-скоростных режимов, наличия абразивной, коррозионной среды, воздействия атмосферных факторов [3]. Наиболее интенсивное изнашивание роликов наблюдается в условиях воздействия сочетания абразивных и коррозионных сред, интенсифицирующих протекание неблагоприятных физико-химических процессов, увеличивающих интенсивность разрушения контактных поверхностей. Например, в условиях воздействия воздушно-соляной среды, характерной для предприятий по добыче минеральных удобрений, наблюдается нелинейный характер изнашивания как резиноканевой ленты, так и стального ролика [3, 4].

Основными эксплуатационными факторами, определяющими ресурс эксплуатации транспортирующей ленты конвейеров, являются коррозия стальной обечайки ролика, вызывающая ухудшение топографии его поверхности трения, рост интенсивности изнашивания материала ленты, и старение резины, ускоряемое циклическим воздействием тепловых и механических нагрузок на локальных участках контакта с металлом [1-3]. На этом основании можно полагать, что одним из эффективных способов повышения ресурса резиноканевых конвейерных лент может быть замена стальной обечайки ролика на обечайку из композитов, содержащих и способных выделять в зону контакта функциональные компоненты, снижающие интенсивность термоокислительных и деструкционных процессов, приводящих к коррозионно-механическому изнашиванию металлополимерных систем [5].

Анализ литературных источников, посвященных проблемам трения и изнашивания конструктивных элементов ленточных конвейеров, эксплуатируемых в различных условиях [1-4], показал перспективность использования металлополимерных конструкций роликов, в которых обечайка выполнена из полимерного композиционного материала. При этом для создания оптимального конструктивного исполнения металлополимерного ролика необходим учет комплекса параметров характеристик – деформационно-прочностных, материаловедческих, конструктивных, триботехнических, технологических.

Типовой ролик состоит из обечайки, изготовленной из отрезка трубы; вкладыша, штампованного из стали или литого из чугуна; оси (или полуоси); подшипника качения (шарикового, а для тяжелых типов – конического роликоподшипника) и его защитного уплотнения. С внутренней стороны подшипник защищен шайбой, канавками во вкладыше или внутренней трубой, которая полностью изолирует его от полости корпуса ролика и служит резервуаром для запаса смазки. Соединение обечайки ролика и корпуса подшипникового узла может быть как в сварном, так и в вальцованном исполнении.

Конструктивно ролики подразделяют на разборные (средняя и тяжелая серии, различаются типом подшипника) и неразборные, которые имеют меньший вес и стоимость, чем разборные.

Разработаны конструкции роликов ленточных конвейеров с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик [4].

Ряд эффективных конструкций роликов ленточных конвейеров разработан специалистами ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». Например, в конструкции [6] использованы полимерные корпуса для подшипников. Конструкция [5] содержит корпус ролика – обечайку, выполненную из полимерного материала. Конструкция, приведенная в [7], включает уплотнение, увеличивающее износостойкость узла трения с шарикоподшипниками.

Анализ научных и патентных источников показывает, что значительная часть конструкций роликов ленточных конвейеров включает преимущественно элементы из металлических материалов (углеродистых сталей). При этом использование таких элементов в ряде случаев не обусловлено особенностями эксплуатации ленточного конвейера в конкретных условиях, а представляет собой сложившийся рутинный подход к решению технической задачи.

Методологические подходы к созданию композиционных материалов на основе полимерных матриц при наличии общих закономерностей характеризуются рядом специфических особенностей, определяемых режимами эксплуатации изделия, требованиями по технологичности изготовления и рециклинга, экономическими параметрами, влияющими на их конкурентность при сравнении с аналогами.

В [8] представлены направления целевого модифицирования полимерных материалов для повышения триботехнических характеристик (рисунок 1).



Рисунок 1. – Некоторые направления модифицирования многотоннажно выпускаемых полимерных материалов [8]

Нам представляется, что предложенные методы модифицирования эффективны не только при создании триботехнических («антифрикционных» по [8]) материалов, но и других видов композитов для изготовления изделий с заданными параметрами эксплуатационных характеристик при соответствующей корректировке методологических подходов.

Анализ многочисленных методов целевого модифицирования высокомолекулярных матриц для получения функциональных материалов с заданными параметрами характеристик, обеспечивающими эффективное применение изделий из них в конструкциях машин, механизмов технологического оборудования, не только подчеркивает их многообразие, но и позволяет сформулировать методологические принципы реализации функционального материаловедения в соответствии со стратегией инновационного развития различных отраслей хозяйственного комплекса. При разработке таких принципов (рисунок 2) учитывали современные тенденции развития промышленной сферы и сферы жизнеобеспечения социумов различного уровня, базирующиеся на перманентном обновлении промышленной продукции, повышении уровня ее потребительских характеристик, в том числе эргономических, в концепте экологического императива в процессе производства и потребления промышленной продукции, концептах разумной достаточности и жизненного цикла.

Применение этих тенденций в практическом функциональном материаловедении композитов для машиностроения позволило выявить основные требования, реализация которых обеспечивает достижение оптимальных технического и социального эффектов:

- оптимизация параметров деформационно-прочностных характеристик;
- повышение параметров триботехнических характеристик в заданных условиях эксплуатации;
- повышение параметров защитных характеристик в определенных условиях эксплуатации.



Рисунок 2. – Методологические принципы модифицирования термопластичных матриц с целью повышения параметров эксплуатационных характеристик изделий из них

Сформированные требования относятся, преимущественно, к области функционального материаловедения для машиностроения и не рассматривают особенности специального материаловедения, объекты которого используют в сфере жилищно-коммунального обеспечения, медицине, сельскохозяйственного производства, спорта и других областях функционирования промышленных и специальных структур.

На наш взгляд, сформированные требования к функциональным композиционным машиностроительным материалам на основе термопластов могут быть обеспечены при реализации основных методологических принципов, состоящих в:

- формировании структуры с оптимальным упорядочением на определенном уровне организации;
- повышении устойчивости к трибо-термокрекингу;
- повышении устойчивости к воздействию термоокислительных и эксплуатационных сред и старению.

Предложенные принципы базируются на современных подходах к управлению структурными характеристиками композиционных материалов на молекулярном, надмолекулярном, межмолекулярном и межфазном уровнях с использованием различных

материаловедческих и технологических решений, которые систематизированы по направлениям:

- легирования матриц реакционноспособными компонентами, образующими химические связи между макромолекулами;
- введения в состав дисперсных, в том числе наноразмерных, компонентов заданного состава, габитуса и энергетического состояния в объем или поверхностные слои;
- термомеханического совмещения расплавов матричного и легирующего компонентов в процессе подготовки и переработки композиционного материала;
- механохимического совмещения матричного и легирующего компонентов при подготовке и переработке композитов в изделие;
- пассивации активных центров макромолекул в процессе создания и переработки композитов и эксплуатации изделий из них;
- введения в состав композитов функциональных добавок, способствующих формированию благоприятных циклов физико-химических, в том числе трибохимических, реакций.

Очевидно, что выбор направления реализации методологического принципа создания функционального материала с определенными параметрами потребительских характеристик зависит от назначения и условий эксплуатации изделия из него в конструкциях конкретной системы.

Характерной особенностью рассмотренных выше методологических принципов создания композиционных материалов для изделий определенного функционального назначения является их прямая или опосредованная взаимосвязь, проявляющаяся в одновременном влиянии выделенного фактора на комплекс структурных и физико-химических процессов, определяющих эксплуатацию в заданных условиях. Например, введение в состав композита наноразмерных модификаторов одновременно влияет на структурные параметры вследствие формирования надмолекулярных образований нового типа, приводит к пассивации активных центров макромолекул вследствие образования адсорбционных связей и изменяет физико-химические процессы, определяющие адгезионные, триботехнические характеристики, стойкость к воздействию термоокислительных сред и старению. Поэтому особый интерес представляет поиск модификаторов комплексного механизма действия, использование которых позволит реализовать синергические эффекты, проявляющиеся в одновременном повышении комплекса параметров служебных характеристик.

При решении задач по созданию композиционных материалов на основе термопластичных матриц для технологического оборудования горнодобывающей промышленности, строительной индустрии и дорожного строительства особый интерес представляют направления, основанные на совмещении матричного и легирующего компонентов при термомеханическом воздействии на их расплавы. Этот подход позволяет формировать структуры с определенным фазовым составом, в которых возможна реализация синергических эффектов благодаря образованию агрегатов легирующего компонента в матричном связующем [9]. Особый интерес представляют композиты, полученные совмещением полимерных компонентов с близким строением молекулярной цепи, которые обладают повышенной термодинамической совместимостью и активным взаимодействием на границе раздела фаз. Вместе с тем, для сохранения индивидуальных характеристик легирующей фазы в композитах из несовместимых полимеров в ряде случаев необходимо использование специальных методов увеличения межфазного взаимодействия без использования специальных модификаторов – компатибилизаторов, имеющих высокие ценовые характеристики, увеличивающие стоимость изделий из таких композитов. В этом аспекте особую перспективу имеют наноразмерные модифика-

торы, способствующие образованию пространственных физических связей между макромолекулами, увеличивающих межфазное взаимодействие на границе раздела фаз.

Эффективным представляется и направление использования наноразмерных частиц в качестве компонента, пассивирующего активные центры макромолекул, создающих предпосылки для зарождения и развития неблагоприятных процессов деструкции, окисления, сшивки и т.п., которые приводят к качественному изменению исходной структуры композита с оптимальными параметрами эксплуатационных характеристик. Развитие этого подхода, ранее рассмотренного в [8], позволит разработать машиностроительные материалы с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик на основе термопластичных матриц крупнотоннажного производства класса полиамидов и полиолефинов, в том числе регенерированных, применение которых в настоящее время не соответствует их потенциальным возможностям.

Исследования выполнены в рамках программы научно-технического сотрудничества по договору № Т19УЗБГ-003 от 21.06.2019 г.

Выводы. Анализ литературных, патентных источников, посвященных материаловедению и технологии композиционных материалов на основе полимерных, олигомерных и смесевых матриц, позволил обосновать целесообразность использования композиционных материалов для изготовления конструктивных элементов роликов ленточных конвейеров, применяемых в различных отраслях промышленного производства. Предложены методологические принципы формирования структуры композиционных материалов на основе термопластичных полимеров, обеспечивающей достижение заданных параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик. Отмечена перспективность использования модификаторов комплексного механизма действия, которые обеспечивают достижение синергического эффекта.

Список использованных источников

1. Бондарев, В.С. Роликоопоры ленточных конвейеров для транспортирования крупнокусковых скальных пород. Транспорт горных предприятий / В.С. Бондарев, И.С. Петухов. – М.: МГИ, 1968. – С. 254-257.
2. Спиваковский, А.О. Теория ленточных конвейеров / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. – М.: Наука, 1982. – 191 с.
3. Ищенко, Р.В. Оптимизация составов композитов для несущего и рабочего слоев обечаек конвейерных роликов / Р.В. Ищенко // Горная механика. – 2009. – № 3. – С. 70-75.
4. Ищенко, Р.В. Повышение надежности быстроизнашивающихся деталей ленточных конвейеров в воздушно-соляной среде: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Р.В. Ищенко; Моск. гос. горный ун-т. – М., 2013. – 22 с.
5. Ролик конвейерный: пат. 8724 Респ. Беларусь, МПК В65G39/00 / В.Я. Прушак, Д.А. Морев; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № u20120354; заявл. 30.03.12; опубл. 30.10.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5 (88). – С. 209.
6. Ролик конвейерный: пат. 17683 Респ. Беларусь, МПК В65G39/09 / Д.В. Дьяков, И.А. Конопляник, Д.Н. Довнар; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № a20110188; заявл. 15.02.11; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5 (94).
7. Ролик ленточного конвейера: пат. 5070 Респ. Беларусь, МПК В65G39/00, В65G39/09 / В.Я. Прушак, В.Я. Щерба; заявитель ЗАО «Солигорский Институт про-

блем ресурсосбережения с Опытным производством». – № а19990197; заявл. 26.02.99; опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 1 (36). – С. 118-119.

8. Струк, В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк. – Минск, 1988. – 325 л.

9. Введение в физику нанокomпозиционных машиностроительных материалов / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: Гродн. гос. аграр. ун-т, 2009. – 439 с.

Информация об авторах

Антонов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий, УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: antonov_as@grsu.by.

Струк Василий Александрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий, УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы» (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Беларусь), e-mail: kaf_mirt@grsu.by.

Авдейчик Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ООО «Молдер» (ул. Скидельское шоссе, 18-1, 230003, г. Гродно, Беларусь), e-mail: info@molder.by.

Абдуразаков Абдуазиз Абдужабарович – преподаватель, Ташкентский институт по проектированию, строительству и эксплуатации автомобильных дорог, (пр. А. Тимура, 20, 100060, г. Ташкент, Узбекистан), e-mail: info@tayi.uz.

Information about the authors

Antonov Alexander Sergeevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of Materials Science and Resource-Saving Technology Department, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: antonov_as@grsu.by.

Struk Vasily Alexandrovich – D. Sc. (Engineering), Professor of Materials Science and Resource-Saving Technology Department, Yanka Kupala State University of Grodno (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Belarus), e-mail: kaf_mirt@grsu.by.

Avdeychik Sergey Valentinovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading engineer, LLC “Molder” (18-1, Skidel'skoe shosse, 230003, Grodno, Belarus), e-mail: info@molder.by.

Abdurazakov Abduaziz Abdujabarovich – Lecturer, Tashkent Institute of design, construction and maintenance of automotive roads (20, A. Timur Ave., 100060, Tashkent, Uzbekistan), e-mail: info@tayi.uz.

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:

1. Соответствие статьи выбранному научному направлению: геотехнология, материаловедение или машиностроение.
2. Актуальность темы, новизна полученных результатов, значимость, их научно-теоретическая, методологическая и практическая ценность, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными.
3. Логика изложения и четкость формулировок.
4. Информативность и качество иллюстрированного материала.
5. Полнота списка литературы, наличие публикаций последних лет и зарубежных публикаций в данной области.
6. Соответствие аннотации и названия тексту статьи.
7. Оценка представленных научных результатов и обоснованность выводов.
8. Мнение рецензента о возможности публикации статьи после исправлений (без исправлений) или необходимости отклонить статью.

Dear reviewer, when writing a review, please follow the following recommendations:

1. Compliance of the article with the chosen scientific direction: geotechnology, materials engineering or machine-building.
2. The relevance of the topic, the novelty of the results obtained, their significance, their scientific and theoretical, methodological and practical value, and their reliability in comparison with the corresponding known data.
3. Logic of presentation and clarity of wording.
4. Information content and quality of the illustrated material.
5. Completeness of the list of references, availability of recent publications and foreign publications in this field.
6. Matching the annotation and title to the text of the article.
7. Evaluation of the presented scientific results and validity of the conclusions.
8. The reviewer's opinion on the possibility of publishing the article after corrections (without corrections) or the need to reject the article.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков, включая пробелы, (примерно 5-6 страниц).
4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 5), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписанную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. Необходимо представить на отдельной странице следующие сведения на русском и английском языках для каждого автора: фамилия, имя, отчество (полностью), ученую степень, звание, должность и место работы, адрес и e-mail организации, почтовый адрес для переписки, номера телефонов, ID ORCID.

1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14,000 typographical units, including spaces, (approximately 5-6 pages).
4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 5), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references. The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
7. Formulae should be created in the «Math Type» editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
10. It is necessary to submit on a separate page the following information in Russian and English for each author: name, surname, patronymic (in full), academic degree, title, position, place of work, address and e-mail of the organization, postal address for correspondence, phone numbers, ID ORCID.



Подписные 749332
индексы: 74933

**Основные направления научно-исследовательской деятельности
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:**

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогательного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогательных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

Адрес редакции:
ул. Козлова, 69
223710, г. Солигорск,
Республика Беларусь

главный редактор (+375 174) 26 28 37
редакция (+375 174) 28 21 07
E-mail: onti@sipr.by <http://www.sipr.by>