



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 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), И.В. Войтов (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), Н.Б. Рыспанов (Казахстан), С.В. Харитончик (Беларусь),
В.М. Шаповалов (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

- Головатый И.И., Диулин Д.А., Дворник А.П.** Эффективность строительства объектов промышленного назначения, включая проходку вертикальных шахтных стволов, горизонтальных и наклонных горно-капитальных выработок в сложных горно-геологических условиях 5
- Ерохин К.А., Лутович Е.А.** Исследование влияния глинистых прослоек на деформирование и устойчивость выработок, расположенных на больших глубинах, в условиях Старобинского месторождения калийных солей 16
- Хорольский А.А., Гринев В.Г.** Разработка нового подхода для выбора способа крепления выработок 27

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Басалай Г.А., Казаченко Г.В.** Некоторые параметры процесса резания соляных пород при испытаниях в лаборатории 37
- Мрочек В.И., Мрочек Т.В., Стефаненко Д.И.** Моделирование механической подсистемы управления рабочим оборудованием фронтального погрузчика 42
- Борис Е.В., Тройнич В.А.** Статические децентрирующие факторы, вызывающие боковой сход конвейерной ленты 49
- Березовский Н.И., Борисейко В.В.** Математическое моделирование процессов пылеулавливания рукавными фильтрами 56
- Левданский И.А., Волк А.М.** Движение твердых частиц в перфорированном элементе при воздействии вихревого газового потока 61
- Масловская М.А., Довгелюк Н.В., Шагулин В.С.** Снижение шума, возникающего при движении грузовых поездов 69

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Пантелеенко Ф.И., Карпец М.Н., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В.** Исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации из высоколегированных проволочных материалов, в контакте с агрессивными средами, используемыми при производстве калийных удобрений 76
- Макеев В.В., Врублевская В.И.** Способ формирования бездефектной структуры модифицированной древесины антифрикционного назначения для изготовления подшипников скольжения широкого размерного диапазона 86
- Авдейчик С.В., Струк А.В., Антонов А.С., Валюк А.Ю.** Композиционные материалы на основе регенерированных термопластов для конструктивных элементов ленточных конвейеров 91
- Лашкина Е.В.** Влияние наноразмерных частиц карбоната кальция на структуру и свойства многофункциональной инсектицидной пленки 102

На обложке: машина погрузочная для подземного склада руды МП-5СР.

На 1-й стр.: блок насосный.

На 1-й и 3-й стр.: буровой насос УНБТ-1180L.

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 25.08.2020 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².

Заказ 2479. Усл. печ. л. 12,82. Тираж 110 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

№ 3 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 Aliaksandr Petrovich

Editorial Board:

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus), I.V. Voitov (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), N.B. Ryspanov (Kazakhstan), S.V. Kharitonchik (Belarus),
V.M. Shapovalov (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

- Golovaty I.I., Diulin D.A., Dvornik A.P.** Efficiency of construction of industrial facilities, including sinking of vertical mine shafts, horizontal and inclined mining and capital workings in difficult mining and geological conditions 5
- Erokhin K.A., Lutovich Ya.A.** Study of the influence of clay interbeds on deformation and stability of workings, located at large depths, in the conditions of Starobin deposit of potassium salts 16
- Khorolskyi A.O., Hrinov V.H.** Development of a new technology for selection of the method of the worked-out space fastening 27

MACHINE-BUILDING

- Basalai R.A., Kazachenko G.V.** Some parameters of the cutting process of salt rocks in laboratory tests 37
- Mrochek V.I., Mrochek T.V., Stefanenko D.I.** Simulation of the mechanical subsystem for controlling the working equipment of a front loader 42
- Borys Ya.V., Troinich V.A.** Static decentring factors causing side descent of the conveyor belt 49
- Berezovsky N.I., Boriseyko V.V.** Mathematical modeling of dust separation processes by bag filters 56
- Levdansky I.A., Volk A.M.** Movement of solid particles in a perforated element under the influence of a vortex gas flow 61
- Maslovskaya M.A., Dovgelyuk N.V., Shagulin V.S.** Ways to reduce the noise of freight trains 69

MATERIALS ENGINEERING

- Panteleenko F.I., Karpets M.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovsky A.V.** Study of corrosion resistance of coatings obtained by the method of hypersonic metalization from high-alloyed wire materials, in contact with aggressive potash fertilizer production 76
- Makeev V.V., Vrublevskaya V.I.** Method of forming a defect-free structure of modified wood inserts of sliding bearings of the wide size range 86
- Avdeychik S.V., Struk A.V., Antonov A.S., Valiuk A.Ju.** Composite materials based on regenerated thermoplasts for structural elements of belt conveyors 91
- Lashkina E.V.** Influence of nanosized particles of calcium carbonate on the structure and properties of multifunctional insecticidal film 102
-
-

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.25.013+622.268.013(045)(476)

Головатый И.И.¹, Диулин Д.А.², Дворник А.П.³¹ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь²ОАО «Трест Шахтоспецстрой», г. Солигорск, Беларусь³ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь**ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПРОХОДКУ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ, ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ГОРНО-КАПИТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В СЛОЖНЫХ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Аннотация. В данной статье представлен опыт строительства объектов промышленного назначения, включая строительство шахтных стволов Краснослободского, Березовского рудников, Петриковского ГОКа, пересечение разломных зон и вскрытие забалансовых горизонтов наклонными выработками.

Ключевые слова: горная выработка, проходка, шахтный ствол, разломная зона, забалансовые запасы.

Golovaty I.I.¹, Diulin D.A.², Dvornik A.P.³¹JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Belarus²JSC “Trest Shahtospetsstroy”, Soligorsk, Belarus³JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, Soligorsk, Belarus**EFFICIENCY OF CONSTRUCTION OF INDUSTRIAL FACILITIES, INCLUDING SINKING OF VERTICAL MINE SHAFTS, HORIZONTAL AND INCLINED MINING AND CAPITAL WORKINGS IN DIFFICULT MINING AND GEOLOGICAL CONDITIONS**

Abstract. This article presents the experience of the effectiveness of the construction of industrial facilities, including the construction of mine shafts of Krasnoslobodsky, Berezovsky mines, Petrikovsky GOK, crossing fault zones and opening off-balance horizons with inclined workings.

Keywords: mine working, sinking, shaft, fault zone, off-balance reserves.

Введение. Специфическая особенность каждого горного предприятия заключается в обязательном наличии запасов природного сырья, использование которых экономически целесообразно для производства продукции при существующей технике и технологии добычи и переработки.

Старобинское месторождение калийных солей открыто в 1949 г. и передано в разработку в 1961 г. с запасами 3,4 млрд тонн. За период с 1961 г. по 2017 г. рудниками ОАО «Беларуськалий» (рисунок 1) добыто более 1,5 млрд тонн сильвинита. Полностью отработан II калийный горизонт, практически исчерпаны запасы сильвинита III горизонта на площади шахтных полей 1 РУ и 2 РУ, погашено более 70 % площади II калийного горизонта в пределах Третьего шахтного поля. В основном в производстве использовались минеральные ресурсы, подготовленные для промышленного освоения в 1960-1970 гг. Такой экстенсивный подход не способствовал развитию минеральных активов предприятия.

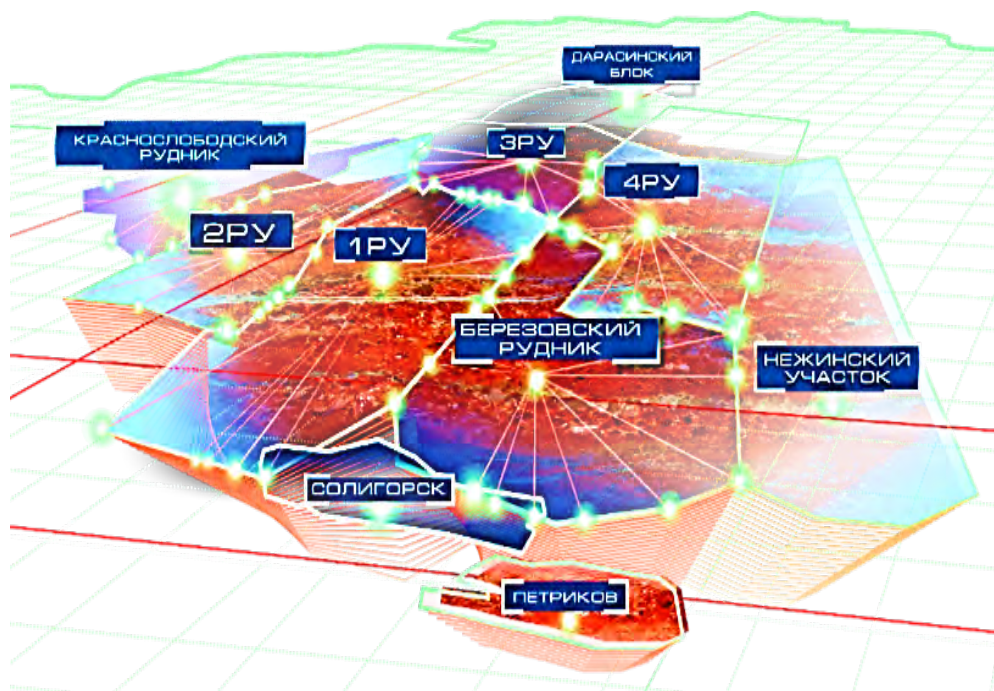


Рисунок 1. – Рудники ОАО «Беларуськалий»

С целью восполнения выбывающих минеральных активов ОАО «Беларуськалий» с 2007 г. перешло к расширенному воспроизводству запасов, обеспечивая стабильное превышение прироста запасов над годовыми объемами добычи. Была сформирована новая концепция поддержания и развития минерально-сырьевой базы предприятия, которая предусматривала широкий спектр научных исследований по изучению забалансовых запасов, а также строительство новых рудников и вскрытие Старобинского и Петриковского месторождений новыми шахтными стволами.

Полученные результаты. ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (далее Общество) – одно из немногих в мире предприятий, выполняющих уникальные по своей сложности работы, не имеющие аналогов по объемам и конструктивным решениям. Имея хорошее инженерное обеспечение, оборудование с эффективными программными комплексами, Общество осуществляет строительство объектов промышленного и гражданского назначения, включая проходку вертикальных шахтных стволов, горизонтальных и наклонных горно-капитальных выработок в сложных горно-геологических условиях. Формирование уникальной модели шахтного строительства «под ключ» требует более качественного и мобильного инженерного обеспечения.

При проходке стволов существует опасность затопления рудника подземными водами, поэтому производство работ по проходке стволов ведется специальными способами замораживания или тампонажа пород. В работах И.М. Паланкоева, А.В. Корчака, А.А. Мишедченко, А.В. Кузиной подробно рассмотрены условия возникновения технологических аварий при проходке вертикальных шахтных стволов способом искусственного замораживания, предложена гипотеза причин разгерметизации замораживающих колонок, обоснована технология взрывных работ [1, 2].

С целью повышения уровня промышленной безопасности Госпромнадзором совместно со специалистами ОАО «Беларуськалий» и ОАО «Трест Шахтоспецстрой» были внесены изменения в «Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь», а также в «Правила по обеспечению промышленной безопасности при проходке стволов (рудников, шахт)

специальными способами», учитывая зарубежный и собственный опыт ведения горных работ [3, 4].

Обществом пройдены скиповой и клетевой стволы Краснослободского рудника (рисунок 2), глубиной 702 м и 636 м соответственно. Срок строительства скипового ствола составил 56 месяцев, в том числе подготовительный период – 23 месяца; клетевое – 55,4 месяца, в том числе подготовительный период – 20 месяцев. На скиповом стволе достигнуты максимальные темпы проходки – 57 м/мес., на клетевом стволе – 47 м/мес. (нормативный темп проходки стволов в обычных условиях – 40 м/мес.) [5].



Рисунок 2. – Краснослободский рудник

Работы на обоих стволах выполнены с высоким качеством. При остаточном нормативном водопритоке в ствол $0,15 \text{ м}^3/\text{ч}$, на скиповом стволе остаточный водоприток составил – $0,003 \text{ м}^3/\text{ч}$, на клетевом – 0. Геометрические размеры крепи и армировки стволов не превышают допустимых по проекту.

Следующим этапом строительства рудников было проведение подготовительных работ по проходке скипового ствола глубиной 665 м и клетевое ствола глубиной 586 м Березовского рудника ОАО «Беларуськалий», в период с мая по ноябрь 2008 [6].

Проходка и крепление скипового ствола окончены 10.06.2011. В период проходки выполнены работы по гидроизоляции крепи ствола, остаточный водоприток на момент сдачи ствола составил $0,05 \text{ м}^3/\text{сутки}$.

Проходка и крепление клетевое ствола окончены в июне 2011 г. В период проходки ствола также выполнены работы по гидроизоляции ствола, остаточный водоприток составил $0,08 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Армировка клетевое ствола основной клетки – канатная; вспомогательной клетки и противовесов обеих клеток – металлическая, жесткая и консольная. Для размещения устройств натяжения канатных проводников и их обслуживания в зумпфе ствола смонтированы 5 площадок. Металлическая армировка (расстрелы и проводники) из профиля коробчатого сечения. Работы окончены в декабре 2012 г.

В период с 2012 г. по декабрь 2016 г. силами Общества выполнены работы по строительству и вводу в эксплуатацию объектов I, II и III очередей Березовского рудника (рисунок 3) (проходка и крепление выработок околоствольного двора и вентиляционного горизонта; проходка и крепление подземных бункеров с монтажом оборудования грузочных комплексов скипового ствола; монтаж конвейеров МКЛ, КЛШ; монтаж оборудования ПЭММ, гаража, склада ГСМ, ППЗ, ПГВУ и т.д.) [4].

В числе объектов, которые начали строить в 2016 году, – вскрытие IV калийного горизонта на 2-м рудоуправлении. Наклонные горные выработки большой протяженности в некоторых случаях эффективнее, чем система горизонтальных и вертикальных. Такие выработки можно проходить проходческими машинами для проходки горизон-

талых выработок, производительность которых гораздо выше, чем производительность комплексов для проходки вертикальных выработок. Проходка велась из существующего III горизонта тремя уклонами протяженностью более 2 километров каждый. Работы производились механизированными комплексами ПКС-8М и КИД-220 в зависимости от вмещающих пород. Когда встречался твердый песчаник, применяли буровзрывной способ.



Рисунок 3. – Березовский рудник

При проведении разведочных уклонов в глинисто-мергелистых горизонтах производилось крепление выработок рамной арочной крепью АП-3 (АКП-3), выполненной из специального профиля СВП-27, с шагом установки арок 0,5 м с затяжкой металлической сеткой по контуру выработки. IV горизонт Старобинского месторождения горными выработками еще нигде не вскрывался. Это первый подобный опыт (рисунок 4).



Рисунок 4. – Вскрытие IV калийного горизонта

Промышленный горизонт Краснослободского участка вскрыт двумя вертикальными стволами, расположенными в Восточном блоке. Для транспортировки добытой

горной массы на сальвинитовую обогатительную фабрику 2 РУ на земной поверхности построен конвейерный тракт длиной 7,5 км. Таким образом, в эксплуатацию была вовлечена основная часть промышленных запасов Краснослободского участка [5, 6]. Для обеспечения полного срока службы рудника в дальнейшем требовалось вскрытие промышленного горизонта и на Западном блоке, отделенного от шахтных стволов рудника Краснослободским разломом, так как в Восточном блоке сосредоточено 60 %, в Западном – 40 % промышленных запасов сальвинита III калийного горизонта Краснослободского участка.

Краснослободский разлом необходимо было перейти или выполнить большой объем строительных работ. Для вскрытия калийной залежи на Западном блоке по стандартной схеме минимально необходима проходка двух вертикальных стволов до промышленного горизонта и строительство инженерной и транспортной инфраструктуры на земной поверхности и под землей: загрузочный узел скипового ствола, околоствольный двор с камерами служебного назначения, поверхностный конвейерный тракт длиной 3,5 км, надшахтные здания, здания подъемных машин, инженерные сети, линии электропередачи и связи, трансформаторные подстанции, что требовало значительных капитальных затрат.

Краснослободский разлом прослеживается от кровли соленосных отложений до фундамента и разделяет участок на Восточный и Западный блоки (рисунок 5). Вертикальная амплитуда разлома на уровне III калийного горизонта изменяется от 30 до 120 м, угол наклона сместителя 50-60° [7, 8]. Такие разломы на Старобинском месторождении калийных солей относятся к блокообразующим и за счет естественной трещиноватости могут являться проводниками агрессивных к ископаемым солям подземных вод в горные выработки рудников. В соответствии с Правилами по защите рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения при ведении горных работ вблизи разломов, требуется выполнять меры защиты от затопления. Вдоль разломной зоны оставляется предохранительный гидроизолирующий целик, в котором запрещена проходка горных выработок.

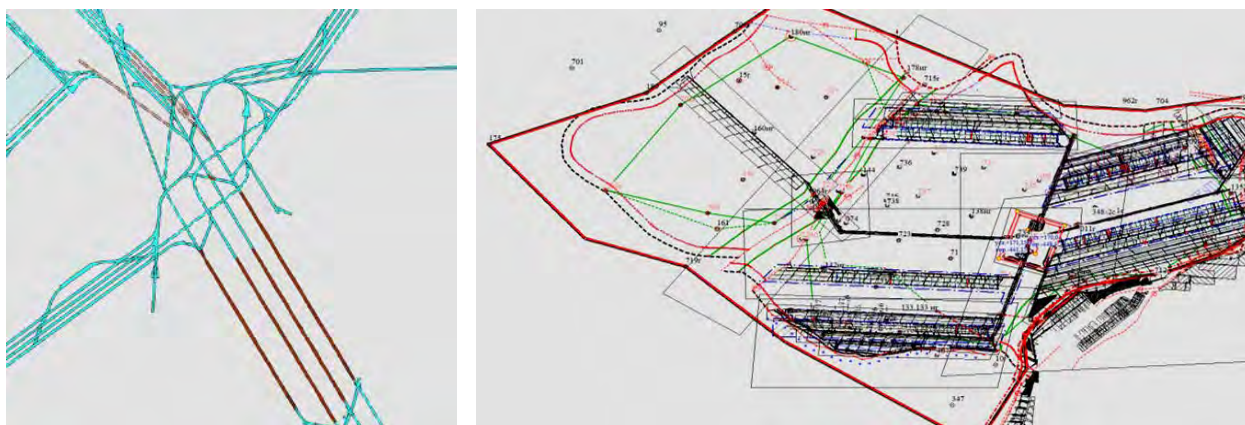


Рисунок 5. – Структурная карта III калийного горизонта Краснослободского участка

Для минимизации рисков в 2011-2014 гг. были проведены широкомасштабные исследования разломной зоны:

- сейсморазведочные работы по уточнению местоположения строения зоны Краснослободского разлома и выделению перспективных участков для пересечения его горными выработками;

- изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий на участках предполагаемого пересечения разлома;
- определение физико-механических свойств и деформационных характеристик горных пород;
- оценка современной геодинамической активности разлома по данным материалов аэрокосмических снимков;
- прогноз безопасной проходки и эксплуатации горных выработок на участке перехода разлома;
- геофизические работы по изучению межскважинного пространства для детализации строения разломной зоны по профилю скважин на участке перехода разлома горными выработками;
- геомеханическое моделирование характера деформаций горных выработок в области разлома;
- разработка исходных данных для проекта вскрытия запасов Западного блока Краснослободского участка через разломную зону.

Три исследовательские гидрогеологические скважины № 964г, № 965г и № 966г, пробуренные в 2012-2013 гг., уточнили местоположение, геологическое строение зоны Краснослободского разлома, а также гидрогеологические и инженерно-геологические условия на участке его предполагаемого пересечения горными выработками.

По гидрогеохимическим показателям (химическому типу, минерализации и содержанию брома) поровые рассолы и водные вытяжки подтверждают, что соленосная толща на участке намечаемого перехода через Краснослободской разлом на уровне III калийного горизонта не испытывала каких-либо существенных инфильтрационных процессов и в настоящее время сохранила высокие естественные водозащитные свойства как от нисходящей фильтрации сверху, так и от восходящей фильтрации снизу. В толще соленосных отложений поровые воды (рассолы) внутрисолевыми породами имеют химический состав, резко отличающийся от состава поровых вод в гематитовой подтолще. Это весьма крепкие и сверхкрепкие рассолы хлоридного магниево-кальциевого и натриево-кальциевого состава. Их минерализация составляет 277,53-645,91 г/дм³.

Таким образом, изученность намечаемого участка перехода через зону Краснослободского разлома в створе разведочных гидрогеологических скважин № 964г, № 965г и № 966г позволила дать заключение о возможности пересечения этой зоны на уровне III калийного горизонта по гидрогеологическим условиям.

Для обеспечения всех технологических процессов рудника при отработке запасов Западного блока (транспорт руды, людей и грузов различного назначения; вентиляция; безопасность ведения горных работ, в том числе в аварийных ситуациях) было выбрано минимально необходимое количество вскрывающих выработок – четыре: конвейерный, транспортный и два вентиляционных штрека. На участке перехода выполнена проходка разведочных выработок, в которых проведены геофизические исследования и гидрогеологические наблюдения. В августе 2016 г. вентиляционным штреком было начато пересечение разломной зоны. Для обеспечения безопасности горных работ проходка выработок осуществлялась с опережающим исследованием призабойного пространства методами геолокации и бурением разведочных шпуров. В местах пересечения выработками разломной зоны и глинисто-карбонатных пород производилась установка металлической арочной крепи. На всем протяжении выработок по соляным породам проведено их крепление металлическими анкерами.

В декабре 2017 г. первая руда Западного блока начала поступать в бункер скипового ствола Краснослободского рудника для выдачи на поверхность. В июле 2018 г.

строительство объекта было завершено в полном объеме, а уже в августе 2018 г. начала отработку запасов Западного блока первая лава № 1-1в. Таким образом, впервые на Старобинском месторождении калийных солей была внедрена технология вскрытия запасов полезного ископаемого отдельного тектонического блока проходкой горных выработок через разломную зону.

Инвестиционный проект по промышленной разработке Петриковского месторождения калийных солей со строительством и вводом в эксплуатацию в Гомельской области горно-обогатительного комплекса (ГОК) мощностью не менее 1,5 млн тонн хлорида калия в год и его последующей эксплуатации реализуется ОАО «Беларуськалий» с 2014 года [9].

Строительство Петриковского горно-обогатительного комплекса (рисунок 6) является самым масштабным инвестиционным проектом ОАО «Беларуськалий» за всю его современную историю. Проект предполагает строительство рудника и сальвинитовой обогатительной фабрики. Выход на проектную мощность, которая составит 1,5 млн т хлорида калия в год, в 2021 году. Планируется, что к 2025 году мощность комбината вырастет до 3 млн т хлорида калия в год.



Рисунок 6. – Строительство Петриковского ГОКа

Общество выполняет 70 процентов работ на данном объекте. Это и земляные работы под строительство ложа под солеотвал и шламохранилища, и строительство вертикальных шахтных стволов.

При строительстве этого объекта шахтопроходчики столкнулись со сложными горно-геологическими условиями и сильными водопритоками до $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Строительство стволов осуществляется специальным способом, заключающимся в замораживании массива горных пород на участке залегания водоносных горизонтов. Основным специальным способом проходки стволов в обводненном породном массиве является искусственное замораживание горных пород с использованием холодильных установок. Конечной целью замораживания породного массива является образование ледопородного ограждения (ЛПО) проектных параметров, обеспечивающих необходимую прочность для сдерживания давления подземных вод.

Процесс искусственного замораживания породного массива принято делить на периоды формирования и поддержания ЛПО требуемых размеров: активное замораживание – образование ледопородного ограждения до начала проходки ствола; пассивное замораживание – поддержание сформированного ограждения в замороженном состоянии до возведения постоянной крепи; размораживание – оттаивание замороженных горных пород до их естественного состояния [10, 11]. Для каждого периода рассчитывают параметры работы замораживающего комплекса строящихся стволов, которые

напрямую зависят от естественной температуры породного массива, времени замораживания, а также от площади поверхности ледопородного ограждения.

В период активного замораживания горных пород холодильные станции, как правило, используют на полную мощность до создания ЛПО проектных размеров. В этот период количество теплоты, отводимое от охлаждаемого породного массива, является максимальным. После того, как ледопородное ограждение сформировано, дальнейшее увеличение толщины ЛПО будет являться нецелесообразной затратой средств, поэтому режим работы замораживающего комплекса меняют. Регулировать холодопроизводительность можно следующими способами: изменением параметров работы компрессоров холодильных станций; постепенным выключением из работы отдельных холодильных станций; периодической работой с остановками в течение суток холодильных станций; установкой дополнительной холодильной станции с холодопроизводительностью, необходимой в начальный период пассивного замораживания пород.

При переходе на режим пассивного замораживания пород ледопородное ограждение должно сохранять свои размеры и прочность. Задача поддержания ЛПО в этот период сводится к отведению от мерзлых горных пород теплопритока со стороны незамороженного породного массива. Однако на практике замораживающие комплексы в большинстве случаев работают с полной нагрузкой от начала замораживания до возведения постоянной крепи в стволе. В результате этого ледопородное ограждение непрерывно увеличивается и на момент окончания периода пассивного замораживания имеет значительно большие размеры, чем те, которые были определены проектом. Следовательно, в процессе формирования и поддержания ЛПО перерасходуются значительные средства.

Для оперативного контроля за процессом формирования и состоянием ледопородного ограждения на участке строительства шахтных стволов Петриковского ГОКа разработана и внедрена интеллектуальная система контроля, которая базируется на использовании технологии оптоволоконной термометрии. Основное отличие данной системы от аналогов заключается в том, что ее структурные элементы позволяют хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, осуществлять сбор параметров работы замораживающих станций стволов и непрерывно обрабатывать данные экспериментальных измерений распределенной температуры породного массива. Кроме того, при помощи данной системы выполняют математическую интерпретацию результатов термометрии скважин, на основании которой определяют трехмерное температурное поле во всем замораживаемом породном массиве [12].

С целью организации режима пассивного замораживания пород и выбора требуемой холодопроизводительности замораживающего комплекса для поддержания ЛПО выполнено математическое моделирование термодинамических процессов, происходящих в породном массиве при различных параметрах работы замораживающих станций ствола.

Замораживание пород вокруг скипового ствола на глубину 265 м было начато в марте 2016 года. После подготовки технологического отхода и смыкания ледопородного ограждения, в декабре 2016 года начато строительство основной части ствола диаметром 10 м в проходке. Проходка ствола выполняется с возведением передовой бетонной крепи, установкой тубинговой колонны и последующим ее тампонажем цементными растворами. Для обеспечения надежной гидроизоляции ствола устанавливается тубинговая колонна общей высотой 516 м.

На счету коллектива 2 рекорда по проходке на 2 стволах Петриковского ГОКа в 2017 году 80 м и 81 м соответственно, что эквивалентно 106 м стандартных стволов в Солигорске. Если учесть, что на новом калийном комбинате стволы имеют 8-метровый диаметр против 7 м на действующих рудниках Старобинского месторождения.

Вскрытие рудных запасов калийного горизонта производится двумя вертикальными шахтными стволами диаметром 8 м и глубиной: ствол № 1 – 808 м, ствол № 2 – 726 м. Также строительство шахтных стволов впервые производится с применением технологии совмещенного выполнения работ по проходке, возведению тубинговой крепи и гидроизоляции ствола за счет применения 2-х проходческих полков и выдачи породы от проходки более производительными породопогрузочными комплексами 2КС-2У40. Применение данной технологии позволяет сократить срок сооружения шахтных стволов ориентировочно на 20÷25 % по сравнению с ранее применявшимися способами проходки. Достигнутые темпы: проходка – 80 м/мес., монтаж тубинговой колонны – 150 м/мес.

Применение разработанной технологии при строительстве новых шахт и рудников позволяет обеспечить безопасность и надежность проходки шахтных стволов в сложных горно-геологических условиях и в 3 раза снизить энергетические затраты на сооружение ледопородного ограждения.

Пласты калийного горизонта Петриковского ГОКа имеют сложное строение и состоят из ритмичного чередования слоев сильвинита, каменной соли и галопелитов с примесью карналлита.

Промышленная пачка калийного горизонта содержит три сильвинитовых слоя (слои 1; 2; 3) и промежуточные галитовые слои (2-3; 1-2). Разработка промышленной пачки предусматривает отдельную выемку верхнего пласта (включает 2 и 3 сильвинитовый слой и промежуточный слой 2-3) и выемку нижнего пласта (1 сильвинитовый слой). Галитовый слой 3 не входит в состав балансовых запасов. По мощности верхний пласт горизонта изменяется от 1,33 до 2,59 м, а нижний пласт – от 0,80 до 1,60 м.

Мощность предприятия по выпуску минеральных удобрений планируется в объеме не менее 1,5 млн т хлорида калия в год. Годовая проектная производительность рудника по руде составит не менее 7,0 млн т, при этом среднее содержание основных компонентов в сильвинитовой руде должно быть:

- хлористый калий (КС1) – не менее 24 %;
- хлористый магний (MgCl₂) – не более 1,6 %;
- нерастворимый остаток (н.о.) – не более 0,5 %.

Для достижения мощности рудника, с учетом реализуемой схемы вскрытия и освоения промышленных запасов Петриковского месторождения, предусматривается подготовка к эксплуатации четырех лав прямым порядком по верхнему пласту (слои 2; 2-3; 3) и четырех лав прямым порядком по нижнему пласту (слой 1), которые обеспечивают выход рудника на проектную производительность 7,6 млн т руды в год.

Расчетный срок обеспеченности рудника запасами кондиционной руды при заданной производительности – 2105 г.

Для отработки рудных запасов Петриковского месторождения в качестве основной принята столбовая система разработки (как обеспечивающая наилучшие показатели в области рационального использования недр и наиболее эффективная по качеству выданного сырья для производства конечного продукта). На незначительных участках шахтного поля Петриковского рудника, где применение столбовой системы разработки по верхнему пласту невозможно по условию недостаточной мощности водозащитной толщи для безопасного ведения горных работ, будет использоваться камерная система разработки. Горно-капитальные и горно-подготовительные работы предусматривается осуществлять механизированным способом при помощи комбайновых комплексов.

Для проведения выработок главных направлений и панельных горно-подготовительных выработок применяются: проходческо-добычные комбайны типа КРП-3-660/1140 в комплексе с бункером-перегрузателем типа БП-14М, самоходным вагоном типа ВС-17 и скребковым перегрузателем типа ППС-1М; осевой вентилятор ти-

па ВМЭ-6 с использованием временных и стационарных ленточных конвейеров, обеспечивающих минимально необходимые габариты горных выработок с устойчивым сводом в их кровле и достаточно высокую производительность проходки. При отработке верхнего и нижнего пластов валовым способом наиболее целесообразно применение гидромеханизированных крепей и очистных комбайнов фронтального действия с двумя шнеками.

Для транспортирования руды по горным выработкам рудника предусматривается конвейерный транспорт, позволяющий полностью механизировать и автоматизировать доставку отбитой калийной руды от эксплуатационных забоев до приемного бункера. Выбор в пользу данного транспорта для доставки руды определен горнотехническими условиями рудника, значительной протяженностью главных направлений (от 5,1 до 13,6 км, с изменением углов падения трассы от 0 до ± 10 градусов), очистных панелей (от 0,8 до 4,3 км), а также высокой производительностью добычной техники, используемой в руднике.

В настоящее время завершена проходка стволов. Установлены подъемные машины. Построены склады руды и концентрата. Возводятся корпуса отделений сальвинитовой обогатительной фабрики, здания и сооружения вспомогательных подразделений, ведется монтаж и наладка основного технологического оборудования.

Строительство Петриковского ГОКа ведется силами только белорусских подрядчиков, без привлечения иностранных компаний.

Заключение. Основные научные разработки ведения горных работ при строительстве объектов промышленного назначения, включая проходку вертикальных шахтных стволов, горизонтальных и наклонных горно-капитальных выработок в сложных горно-геологических условиях, закреплены в Правилах по обеспечению промышленной безопасности, что нашло свое отражение в безаварийной работе Общества. Более того, большая часть горно-шахтного (95 %) и обогатительного (80 %) оборудования изготавливается на машиностроительных заводах и предприятиях Республики Беларусь применительно к конкретным горно-геологическим условиям.

Появление в Полесском регионе современного экспортноориентированного производства с большим научным потенциалом повлечет за собой развитие науки по ресурсосберегающему освоению Петриковского месторождения, созданию новых рабочих мест, придаст импульс развитию местной промышленности, вызовет пополнение республиканского и местных бюджетов за счет налогов и платежей, приведет к развитию социальной инфраструктуры.

Список использованных источников

1. Паланкоев, И.М. Анализ причин возникновения аварийных ситуаций при проходке вертикальных стволов способом искусственного замораживания грунтов / И.М. Паланкоев // Безопасность Труда в Промышленности. – 2014. – № 2. – С. 49-53.

2. Корчак, А.В. О проблемах совершенствования технологии проходки вертикальных стволов в искусственно замороженных породах / А.В. Корчак, А.А. Мишедченко, А.В. Кузина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 2. – С. 7-13.

3. Правила по обеспечению промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь: постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 30.08.2012 № 45 (в ред. постановлений МЧС от 10.04.2014 № 10, от 19.11.2014 № 34, от 23.03.2017 № 7; исключено с 14 апреля 2017 года: постановление МЧС от 23.03.2017 № 7). – Введ. 10.10.2012. – Минск: Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – 153 с.

4. Правила по обеспечению промышленной безопасности при проходке стволов (рудников, шахт) специальными способами: постановление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь от 21.05.2015 № 26 (в ред. постановлений МЧС от 12.12.2016 № 71, от 23.02.2018 № 9). – Введ. 01.08.2015. – Минск: Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, 2018. – 31 с.

5. Исследование газоносности соляных пород Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника / С.С. Андрейко [и др.] // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 69-73.

6. Перспективные технологические схемы подготовки и отработки Третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника / И.И. Головатый [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 24-35.

7. Состояние и перспективы развития геофизических исследований в подземных выработках Старобинского месторождения калийных солей / В.Б. Вагин [и др.] // Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 45-48.

8. Оценка газодинамических характеристик горных пород Краснослободского разлома / Д.В. Барбиков [и др.] // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 38-42.

9. Барбиков, Д.В. Петриковское месторождение калийных солей (Северный участок) и его гидрогеологическая изученность / Д.В. Барбиков, С.Н. Кацемба, Д.М. Курлович // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 38-47.

10. Барбиков, Д.В. Новейшая геодинамика Северного участка Петриковского месторождения калийных солей / Д.В. Барбиков, Д.М. Курлович, В.Э. Кутырло // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2017. – № 2. – С. 175-183.

11. Технология устройства ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов на примере объектов Петриковского ГОКа / П.А. Витязь [и др.] // Вести НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2019. – Т. 64, № 3. – С. 366-377.

12. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов / И.И. Головатый [и др.] // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 48-53.

Информация об авторах

Головатый Иван Иванович – Генеральный директор ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Диулин Денис Александрович – Генеральный директор ОАО «Трест Шахтоспецстрой» (223710, Солигорск-4, Беларусь), e-mail: trest@shahta.by.

Дворник Александр Петрович – кандидат технических наук, начальник отдела научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Information about the authors

Golovaty Ivan Ivanovich – General Director, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: belaruskali.office@kali.by.

Diulin Denis Aleksandrovich – General Director, JSC “Trest Shahtospetsstroy” (223710, Soligorsk-4, Belarus), e-mail: trest@shahta.by.

Dvornik Aliaksandr Petrovich – Ph. D. (Engineering), Head of scientific and technical information Department, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Поступила в редакцию 01.07.2020 г.

УДК 622.268.6

Ерохин К.А., Лутович Е.А.

*Научно-производственное унитарное предприятие «Институт горного дела»,
г. Солигорск, Беларусь*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ ПРОСЛОЙКОВ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ И УСТОЙЧИВОСТЬ ВЫРАБОТОК, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ, В УСЛОВИЯХ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Аннотация. *Выполнен анализ результатов проведенных натурных исследований деформирования контура протяженных выработок, заложенных на больших глубинах в условиях неустойчивых пород Третьего калийного пласта Старобинского месторождения, оценено влияние геологических факторов.*

Ключевые слова: *горная выработка, глинистые прослойки, агрегатная прочность, устойчивость выработки, смещения кровли, охрана и крепление горных выработок.*

Erokhin K.A., Lutovich Ya.A.

Scientific Production Unitary enterprise "Institute of Mining", Soligorsk, Belarus

STUDY OF THE INFLUENCE OF CLAY INTERBEDS ON DEFORMATION AND STABILITY OF WORKINGS, LOCATED AT LARGE DEPTHS, IN THE CONDITIONS OF STAROBIN DEPOSIT OF POTASSIUM SALTS

Abstract. *An analysis is made of the results of field studies of the deformation of the contour of extended workings laid at large depths in the conditions of unstable rocks of the Third potash layer of the Starobin deposit. The influence of geological factors is estimated.*

Keywords: *mine working, clay interbeds, aggregate strength, working stability, roof displacement, protection and support of mine workings.*

Введение. В связи с интенсификацией отработки запасов вопрос о выемке запасов в 4 сильвинитовом слое на глубинах более 800 м является актуальным. При отработке данных запасов особенно остро встает вопрос обеспечения устойчивости выработок. Причиной этого является низкая (15-20 МПа) агрегатная прочность пород кровли $\sigma_{сж}$ [1], которая на больших глубинах H приводит к возрастанию удельной нагрузки $\gamma H/\sigma_{сж}$ (где γ – объемный вес вышележащих пород, $\gamma = 0,021$ МН/м³), превышающей значение, при котором меняется характер их деформирования. Уже при $\gamma H/\sigma_{сж} = 0,7$ соляные породы переходят в стадию интенсивной ползучести с разрыхлением, разуплотнением [2]. При больших удельных нагрузках (на глубинах свыше 750 м и прочности пород в кровле $\sigma_{сж} \approx 15$ МПа) скорость ползучести пород существенно возрастает, достигая предела деформирования 3 % от пролета выработок за короткий промежуток времени. В этих условиях влияние геологических факторов на устойчивость выработок является определяющим при отработке запасов на больших глубинах, а изучение влияния этих факторов – первоочередной задачей для обоснования выбора рациональных мер охраны и крепления горных выработок.

Основная часть. Поскольку соляные породы по своему составу и строению неоднородны, важным является выбор места расположения в них выработки, а также ее формы и размеров поперечного сечения. Для соляных пород с уровнем нагружения

$\gamma H/\sigma_{сж} \leq 0,7$ арочная форма поперечного сечения с радиусом закругления R позволяет создать дополнительную опору для вышележащих пород, близкую к $\frac{1}{3} \cdot R$, что уменьшает пролет кровли выработки, породы над которым расслаиваются под действием сил бокового отпора и прогибаются. При наличии в каждой из сторон поперечного сечения выработки закруглений радиусом R и отсутствии в кровле плоской части $l_{пл}$ ее пролет b со стороны пород кровли уменьшится до, так называемого, расчетного или эквивалентного пролета $b_{эКВ}$, который составит:

$$b_{эКВ} = b - 2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot R \right) = 2 \cdot R - \frac{2}{3} \cdot R = \frac{4}{3} \cdot R, \text{ м.} \quad (1)$$

При наличии в кровле плоской части $l_{пл}$ ее эквивалентный пролет $b_{эКВ}$ составит:

$$b_{эКВ} = \frac{4}{3} \cdot R + l_{пл}, \text{ м.} \quad (2)$$

Подобные эквивалентные пролеты были определены с помощью компьютерного моделирования для выработок с другими применяемыми на месторождении формами поперечного сечения, а также для их сопряжений, камер служебного назначения, имеющих сложную в плане геометрию [1]. В соответствии с рассчитанным пролетом, используя закономерности образования сводов обрушений или давлений в соляных породах (например, угол образующей свода к горизонтальной плоскости α близок к 55° [3, 4]), можно определить высоту такого свода h_k для кровли, имеющей в сечении арочную форму:

$$h_k = \frac{b_{эКВ}}{2} \cdot \text{tg } \alpha = \frac{b_{эКВ}}{2} \cdot \text{tg } 55^\circ = 0,71 \cdot b_{эКВ}, \text{ м.} \quad (3)$$

Для выработки арочной формы с $R = 1,5$ м и пролетом $b = 3$ м, расположенной в устойчивых породах на глубине до 750 м, высота свода в кровле h_k составит 1,4 м. Однако для почвы этой же выработки, имеющей пролет b , высота свода давления $h_{пл}$ составит 2,1 м:

$$h_{пл} = \frac{b}{2} \cdot \text{tg } 55^\circ = 0,71 \cdot b \approx 2,1 \text{ м.} \quad (4)$$

Обследования капитальных и подготовительных выработок на глубинах более 700 м показали, что механизм деформирования соляных пород в их кровле и почве выработок одинаков [3, 5]: в обоих случаях в них формируется свод давления, создающий в ближних к контуру прочных соляных прослойках усилия бокового отпора со стороны боковых пород. В пределах данного свода как в кровле, так и в почве выработок образуется одна из зон дезинтеграции, границы которой можно наблюдать при ее вскрытии другими выработками. Также данными обследованиями установлено, что при уровне нагружения пород $\gamma H/\sigma_{сж} \geq 0,7$ (на глубинах свыше 750 м с привязкой кровли выработок в 4 сильвинитовом слое) при попадании их в зону влияния других выработок временного опорного давления лавы, эффект устойчивости кровли из-за арочной формы ее поперечного сечения снижается. В элементах сводчатых частей (так называемых «козырьках») даже в случае их подкрепления анкерами образуются заколы, которые приходится устранять. Для участков конвейерного, вентиляционного штреков лавы 10в, расположенных вблизи узлов сопряжений и заложенных на глубине 800-830 м с хватом в кровле 0,17 м 4 сильвинитового слоя, еще вне зоны влияния очистных работ высота свода давления в кровле h_k достигает 2 м. Именно этот интервал принято анализировать при определении типа кровли по ее устойчивости [1]. Однако, как показали проведенные в этих выработках исследования с помощью станций глубинных реперов

[4], на участках с повышенным содержанием глинистых прослоек (смотри ниже) при увеличении пролетов b до 4-7 м высота свода давления в них может намного превышать данный интервал.

Для определения типа кровли используются показатели: содержание слабых прослоек η и средняя мощность прочных слоев на 2-х метровом интервале $\sum(m_{гс}/n)$. Последний показатель не применяется в краевых зонах Третьего калийного пласта. Также возникают проблемы при использовании показателя η для пород кровли, расположенных в пределах 4 сильвинитового слоя и выше его, при отнесении их к I типу устойчивости (к наименее устойчивым породам, содержащим $\eta \geq 30\%$ слабых прослоек) [1] рекомендовано использовать усредненный предел прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж} = 20,6$ МПа. Однако для выработок, расположенных на глубинах более 750 м в пределах 4 сильвинитового слоя и выше, с увеличением высоты свода давления более 2 м во взаимодействие вовлекаются породы, содержащие до 80-90 % слабых прослоек, имеющие агрегатную прочность $\sigma_{сж} \approx 15-17$ МПа. Очевидно, что эти условия не соответствуют принятой нормативными документами типизации пород кровли.

В работе [3] в качестве геологических факторов, которые необходимо учитывать при оценке устойчивости выработок по смещению их кровли U_k , предлагается использование мощности ближней к контуру защитной пачки пород m_k и суммарной мощности глинистых прослоек $\sum \eta_{г}$ в своде давления h_k . Применительно к абстрактной выработке (обобщенно) первый фактор можно представить в безразмерном виде: $m_k/b_{эkv}$. Второй фактор в безразмерном виде $\sum(\eta_{г}/h_k)$ представляет собой относительное содержание глинистых прослоек $\eta_{г}$. Оба этих фактора можно представить в виде единого комплексного геологического показателя $m_k/(b_{эkv} \cdot \eta_{г})$, в котором увеличение числителя снижает интенсивность деформирования кровли, а увеличение знаменателя ведет к ее росту. В случае отсутствия влияния на деформирование выработки геологического фактора смещение ее кровли U_k близко к смещению одного из боков U_6 (половине величины конвергенции боков U_{66}). В случае его наличия связь между U_k и U_6 приобретает линейный характер, постоянный во времени (до разрушения одного из элементов контура выработки или применения к ней дополнительных мер охраны и крепления), и характеризуется коэффициентом неравномерности деформирования контура K_k [3, 5]:

$$K_k = \Delta U_k / \Delta U_6, \quad (5)$$

где ΔU_k – смещение кровли за интервал времени ΔT ;

ΔU_6 – среднее смещение боков (половина величины конвергенции «бок-бок») за интервал времени ΔT .

Для проверки справедливости зависимостей (1)-(5) для выработок с большой глубиной заложения, возможности их использования при оценке устойчивости пород, выбора способов поддержания и их параметров был проведен анализ геологической информации, данных о прочностных свойствах пород и их деформировании в окрестности выработок. Для этого использовались архивные [6] и текущие данные о деформировании подготовительных выработок, заложенных в центральной части шахтного поля рудника 4 РУ на глубине 750-850 м, данные о строении пород и их прочности, полученные в процессе подземного разведочного бурения 18 скважин и испытания их керн на одноосное сжатие. Выработки, в которых проводились исследования, имели арочную форму поперечного сечения, пролет $b = 3$ м. Анализировался период натуральных замеров в этих вы-

работках с момента их проведения до применения в них каких-либо мер охраны или крепления. Данный период составлял от 240 до 1200 суток. Привязка кровли выработок осуществлялась в четырех вариантах: 1 – с оставлением 1,5 м подстилающей каменной соли (к.с.); 2 – с оставлением 0,3 м 3 сильвинитового слоя (с.с.); 3 – с прихватом 0,17 м 4 сильвинитового слоя; 4 – с оставлением 0,4 м 4 сильвинитового слоя. К концу срока наблюдения выработки со вторым, третьим и четвертым вариантами заложения из-за попадания в зону влияния очистных работ были разрушены, при этом разрушение их сводчатой части (kozyрьков) произошло лишь в последних двух вариантах. Характер разрушения кровли дал основание предполагать, что ширина и высота сформированного свода давления в месте проведения исследований не превысили 2 м.

Характер связи между смещением кровли и боков выработок всех четырех вариантов привязок представлен на рисунке 1. Данные замеров обработаны с помощью линейной аппроксимации вида $y = ax + b$, где $y = U_k$; a – коэффициент при U_6 , характеризующий угол наклона линии аппроксимации, он соответствует коэффициенту неравномерности смещений контура K_k ; b – свободный коэффициент, характеризующий точку пересечения с осью ординат, он определяет величину расслоения кровли в первые сутки после проведения выработки.

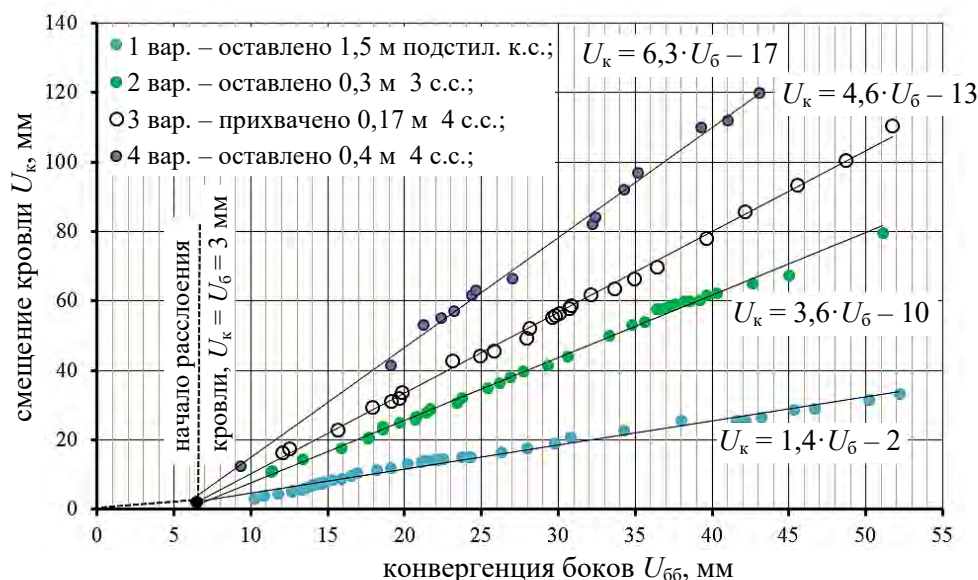


Рисунок 1. – Характер связи между смещением кровли и боков выработок для четырех вариантов привязок их кровли к Третьему пласту

Из рисунка 1 можно определить, что первоначально (до $U_{66} = 6$ мм или $U_k = U_6 = 3$ мм) деформирование элементов породного контура выработки происходило одинаково во всех направлениях, что свидетельствует о гидростатическом распределении первоначальных напряжений в массиве. При достижении смещений контура более 3 мм (как правило, для этого забой выработки удаляется от нее более, чем на 12 м [5]) происходит расслоение пород в наиболее слабых элементах контура (кровле и почве) и формирование в них сводов давления, за счет чего напряжения в приконтурных породах перераспределяются. Характер дальнейшего деформирования определяется напряжениями в боках выработки, формируемыми вертикальной составляющей $\sigma_b = \gamma H$, и дополнительными нагрузками, возникшими после проведения выработки, за счет перераспределения (снятия) нагрузки с извлеченных пород на бока выработки. Их совокупность формирует усилия воздействия пород в боках выработки (называемые еще боко-

вым отпором) на породы кровли и почвы, находящиеся в своде давления. Со временем усилия бокового отпора могут уменьшаться (из-за релаксации напряжений), либо возрастать (из-за попадания в зону влияния соседних выработок, очистных работ и др.), но они являются определяющими в деформировании пород кровли выработки. Данный вывод подтверждается линейной зависимостью между U_k и U_6 , характеризующейся высокой теснотой связи (коэффициент детерминации для всех графиков был не ниже 0,93) и существующей на протяжении всего времени устойчивого состояния выработок, в том числе и в период попадания их в зону влияния очистных работ.

Также из рисунка 1 видно, что минимальная величина коэффициента K_k характерна для первого варианта ($K_k = 1,4$), а максимальная – для четвертого варианта ($K_k = 6,3$) расположения выработки в Третьем пласте. Анализ геологической информации показал, что средняя мощность защитной пачки в кровле m_k для вариантов с первого по четвертый соответственно составляет: 0,25 м; 0,29 м; 0,18 м; 0,19 м, а среднее содержание глинистых прослоек в своде давления кровли с $h_k = 2$ м составляет: 4,5 %; 16 %; 32 %; 47 %. Очевидно, что в рассматриваемых вариантах на рост K_k в значительной степени оказывает влияние не мощность защитной пачки m_k , которая изменяется незначительно, а содержание глинистых прослоек η_{Γ} . Установлено, что зависимость между η_{Γ} и K_k обладает высокой теснотой связи (коэффициент детерминации $R^2 = 0,947$), а ее вид при линейной аппроксимации следующий:

$$K_k = 0,1038 \cdot \eta_{\Gamma} + 1,3, \quad (6)$$

где η_{Γ} – содержание глинистых прослоек в своде давления, %.

Область использования выражения (6) – выработка с пролетом $b = 3$ м. Из выражения (6) следует, что рост содержания глинистых прослоек в кровле в 10 раз (с 4,5 до 47 %) приводит к росту коэффициента K_k , характеризующего рост смещения кровли по отношению к смещению боков, более, чем в 3 раза.

В работе [6], анализирующей данные этих же натуральных замеров, сделан вывод о том, что при отношении смещений кровли к смещению боков, равном 5 и более (т.е. $K_k \geq 5$), деформирование пород кровли выработок происходит в режиме прогрессирующей ползучести, с интенсивностью, не позволяющей обеспечить их устойчивость в течение заданного (обычно 2-3 года) срока их службы. Величину критических деформаций элементов контура, при которых рассматриваемые выработки начинали разрушаться, можно принять равной 100-120 мм, что составляет 3,3-4 % от их пролета b . Как показали расчеты, проведенные с использованием аппарата теории ползучести [2, 5, 7], данные деформации реализуются в боках одиночных выработок, заложенных на глубине 750-800 м, не имеющих мер охраны и не попадающих в зону влияния очистных работ, более 120 лет. С учетом же ослабления глинистыми прослойками пород кровли и ее более раннего разрушения время устойчивого состояния этих выработок T_y для каждого из 4 рассмотренных вариантов привязки соответственно составит: 75 лет; 40 лет; 6 лет; 1 год. Наиболее точно соответствует данной зависимости экспоненциальная аппроксимация, вид у которой следующий:

$$T_y = 210 \cdot \exp(-0,11 \cdot \eta_{\Gamma}). \quad (7)$$

Следует отметить, что зависимость (7) получена на основании небольшого количества данных и может рассматриваться лишь как оценочная. Однако с помощью нее можно определить, что увеличение на каждый процент содержания глинистых прослоек в кровле (при условии, что η_{Γ} изменяется в диапазоне от 5 до 47 %) может снизить время устойчивого состояния выработок более, чем на 1-3 года.

Влияние глинистых прослоек также можно оценить через снижение агрегатной прочности пород. На рисунке 2 показан график изменения прочности пород с удалением от кровли 3 сальвинитового слоя. Зависимость получена путем аппроксимации полиномом 4-й степени данных испытаний образцов керна из 18 скважин подземного разведочного бурения.

Как видно из рисунка 2, наиболее высокая изменчивость прочности пород наблюдается на расстоянии до 6 м от кровли 3 сальвинитового слоя. Кроме того, имеется значительный разброс данных относительно кривой их аппроксимации (коэффициент детерминации R^2 не превышает 0,2), что связано с высокой изменчивостью содержания глинистых прослоек в центральной части шахтного поля горизонта –670 м рудника 4 РУ.

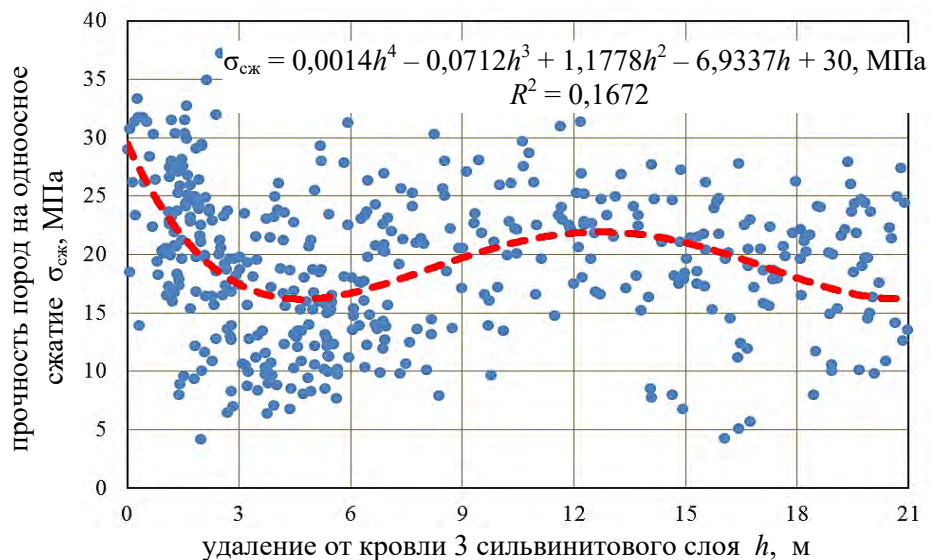


Рисунок 2. – График зависимости изменения прочности пород Третьего калийного пласта с удалением от кровли 3 сальвинитового слоя

Результаты анализа изменчивости содержания глинистых прослоек в породах Третьего калийного пласта приведены в виде графика на рисунке 3. Расчет содержания глинистых прослоек осуществлялся по всем анализируемым скважинам поинтервально с шагом 0,5 м. Как видно из рисунка, связь между удалением от кровли 3 сальвинитового слоя и содержанием глинистых прослоек имеет высокую тесноту связи (коэффициент детерминации $R^2 = 0,8146$) и аппроксимируется полиномом 4-й степени.

В результате сопоставления усредненных в интервалах по 0,5 м значений содержания глинистых прослоек и с усредненными в этих же интервалах прочностными показателями получена зависимость, которая представлена в виде графика на рисунке 4.

Вид зависимости при линейной аппроксимации данных следующий:

$$\sigma_{сж} = 26,35 - 0,173 \cdot \eta_{Г}, \text{ МПа.} \quad (8)$$

Из графика на рисунке 4 видно, что увеличение содержания в кровле глинистых прослоек в интервале от 8 до 80 % способно уменьшить агрегатную прочность пород с 26 до 13 МПа. При этом для одинаковой глубины заложения выработок (например, $H = 800$ м) при заложении их кровли выше 3 сальвинитового слоя уровень нагружения пород $\gamma H / \sigma_{сж}$ возрастает с 0,7 до 1,3, что переводит их в запредельную стадию деформирования [2] с явлениями разрыхления и разуплотнения, увеличением скорости смещения контура в 3-5 раз.

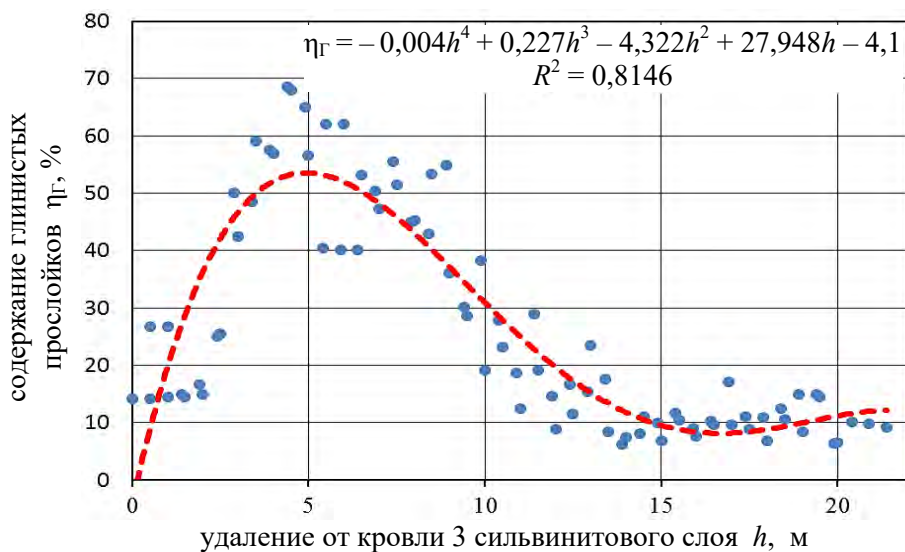


Рисунок 3. – График зависимости изменения содержания глинистых прослоек в Третьем калийном пласте с удалением от кровли 3 сальвинитового слоя

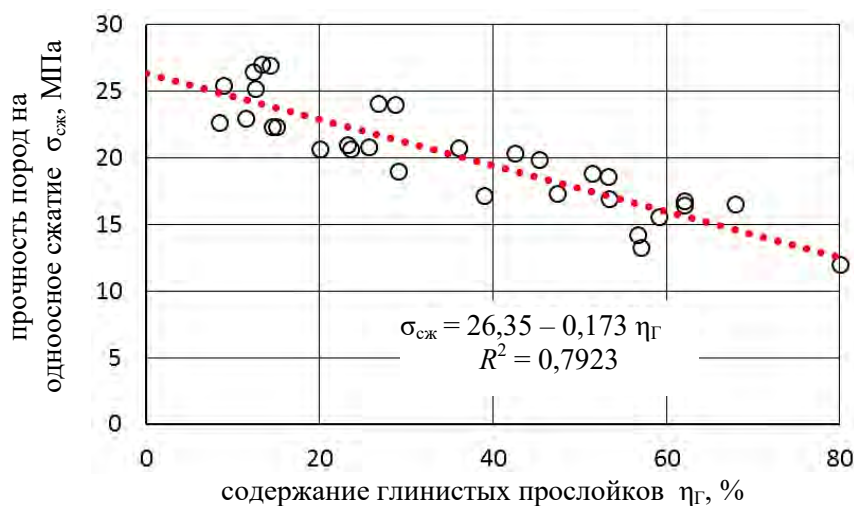


Рисунок 4. – График зависимости прочности пород на одноосное сжатие от содержания глинистых прослоек в Третьем калийном пласте

Подобный характер деформирования выработок имеет место при их попадании в зону временного опорного давления лавы. Очевидно, что с уменьшением агрегатной прочности приконтурных пород изменяется картина напряженно-деформированного состояния вокруг выработок, возрастают размеры зональной дезинтеграции, свода давления. Все это требует пересмотра применяющихся подходов при прогнозе деформирования выработок, оценке эффективности применения различных мер охраны.

С 2018 г. Унитарным предприятием «Институт горного дела» проводятся исследования деформирования кровли подготовительных выработок, закладываемых в сложных горно-геологических условиях для отработки 4 сальвинитового слоя. Наиболее сложными оказались условия заложения выработок лавы № 10в. Глубина их заложения $H = 800-830$ м. Подготовка и отработка запасов на этом участке шахтного поля 4 РУ осуществляется согласно типовой технологической схеме слоевой выемки пласта Третьего калийного горизонта с последовательной отработкой слоев для сложных условий поддержания выработок верхней лавы. Выработки лавы № 10в пройдены с прихватом в

кровле 0,17-0,18 м 4 сильвинитового слоя (3 вариант привязки, рассмотренный на рисунке 1). Часть выработок (вентиляционный штрек № 2, технологические сбойки) проходится в зоне остаточного опорного давления лавы соседнего выемочного столба.

В процессе проведения исследований было отмечено, что разрушение выработок на отдельных участках происходило уже в процессе их проходки. Характерная потеря устойчивости наблюдалась на участках вентиляционного штрека, проходимого первым, а также сбоек с ним, впоследствии попадающих в зону влияния соседних выработок, а также в камерах привода конвейера и камерах разворота самоходного транспорта, имеющих эквивалентный пролет $b_{\text{экв}} = 5-7$ м. В процессе оборки кровли разрушенных участков выработок наблюдениями на станциях глубинных реперов [4] было установлено, что высота свода расслоения h_p на протяженных участках выработок приближается к их пролету b , а на расширенных участках, в камерах служебного назначения – к их эквивалентному пролету $b_{\text{экв}}$. Для изучения данных явлений была проанализирована изменчивость содержания глинистых прослоек в кровле выработок выемочного столба лавы 10в до высоты 6 м. Для наглядной иллюстрации эти данные приведены в таблице в виде среднего содержания глинистых прослоек в интервалах от 0 до 2, 3, 4, 5 и 6 м.

Таблица. – Среднее содержание глинистых прослоек в кровле выработок лавы № 10в рудника 4 РУ

Наименование или местоположение скважины	Интервал пород кровли				
	0-2 м	0-3 м	0-4 м	0-5 м	0-6 м
	Среднее содержание глинистых прослоек в кровле η_r в интервалах, %				
Скважина № 7, монтажный штрек лавы № 34 у границы с лавой № 10в	35,3	46,3	51,5	59,1	60,0
Монтажный штрек лавы № 10в	38,2	44,1	53,4	61,2	63,9
Исслед. выработка лавы № 10в	38,5	51,1	61,0	67,8	71,7
Камера разворота № 7 лавы № 10в	39,0	51,9	57,6	66,7	71,6
Камера разворота № 6 лавы № 10в	40,3	51,2	56,9	65,2	69,5
Камера привода № 3 лавы № 10в	24,3	33,1	39,5	47,5	54,7
Скважина № 237s, камера привода № 2 лавы № 10в	24,3	33,1	38,5	39,9	45,5
Скважина № 238as, заезд в лаву 10в	26,1	34,7	37,2	41,4	46,8
Скважина № 237as, заезд в лаву 10в	23,8	31,3	34,7	37,4	42,1

Как видно из таблицы, содержание глинистых прослоек растет во всех скважинах при увеличении интервала пород кровли, то есть по мере удаления от устья скважины (кровли выработки) их доля возрастает и в отдельных случаях становится преобладающей. Максимальное содержание глинистых прослоек (40,3-69,5 %) обнаружено в районе камеры разворота самоходного транспорта № 6, вокруг которой по станциям контурных и глубинных реперов оконтурена зона повышенных деформаций контура выработок и выявлены аномалии в распространении свода расслоения в породах их кровли.

На рисунке 5 представлен план горных выработок выемочного столба лавы № 10в в районе камеры разворота № 6 с изолиниями скорости ползучести кровли $V_{\text{ПК}}$. Этот показатель является аналогом скорости смещения, линеализированной за счет аппроксимации временных интервалов степенной функцией $(1-\alpha)$ при $\alpha = 0,7$ [2-5, 7]. Для одиночных выработок с пролетом $b = 3$ м, заложенных в особо неустойчивых породах

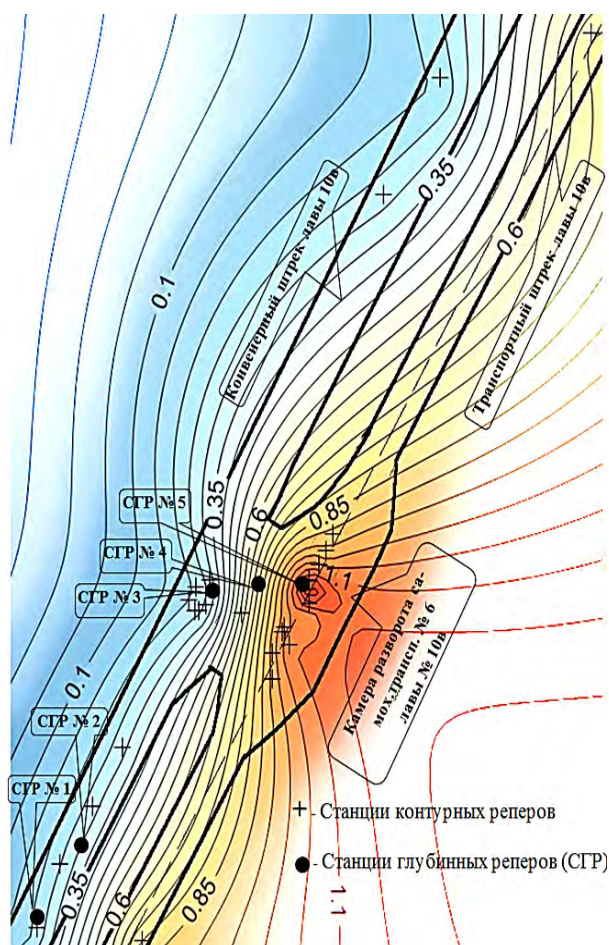


Рисунок 5. – План горных выработок столба лавы № 10в с изолиниями скорости ползучести кровли $V_{ПК}$ (мм/с^{0,3}) и станциями контурных, глубинных реперов

сопряжений – до 17 % всех расслоений приходится на интервал от 0 до 2,3 м; 17-44 % – на интервал от 2,3 до 4,3 м; 11-41 % – на интервал от 4,3 до 6 м. На участках с максимальными смещениями пород кровли (станция глубинных реперов № 5 на рисунке 5) наблюдаются расслоения пород кровли на удалении свыше 6 м от контура. Доля этих смещений может составлять более 30 % от полных смещений кровли.

На основании исследований можно предположить, что на участках с высоким (> 40 %) содержанием глинистых прослоек в 2-х метровом интервале кровли и глубинах $H \geq 800$ м, и уровнем нагружения $\gamma H / \sigma_{сж} \geq 0,84$ (с учетом $\sigma_{сж}$, определенного по зависимости (6)) сразу после проведения выработок происходит формирование свода давления на высоту, близкую к их пролету b (эквивалентному пролету $b_{экр}$). При этом во взаимодействие вовлекаются породы кровли, расположенные в этом своде, состав которых (в первую очередь – содержание глинистых прослоек) необходимо учитывать при прогнозе устойчивости выработок и выборе мер их охраны. Очевидно, что данный вывод является предварительным и требует подтверждения при исследованиях на других участках шахтных полей Старобинского месторождения.

Выводы. Оценено влияние геологических факторов на характер деформирования пород кровли протяженных выработок в зависимости от их заложения в пласте.

(третий и четвертый варианты привязок на рисунке 1), в этих условиях $V_{ПК}$ равен 0,1 мм/с^{0,3}. Для конвейерного штрека пролетом 3,8 м, охраняемого щелями в боках и находящегося под защитой транспортного штрека, $V_{ПК}$ достигает значения 0,35 мм/с^{0,3}, для транспортного штрека пролетом 3 м, охраняемого щелями в боках и кровле, – $V_{ПК} = 0,6$ мм/с^{0,3}. В центре камеры разворота № 6 значение параметра $V_{ПК}$ достигает 1,1 мм/с^{0,3}.

Отмечено, что из имеющихся 7 камер разворота, в камере № 6 и в камере № 7 наблюдаются повышенные (на 10-15 %) скорости ползучести кровли. Анализ данных смещений контура и поинтервальных смещений (расслаиваемости) пород кровли по глубинным реперным станциям, установленным в районе камер разворота № 6 и № 7, показал, что на протяженных участках штреков большая часть деформаций (в среднем – 63 %) происходит на интервале 2,3-4,3 м, а на интервале от 0 до 1,3 м, закрепленном винтовыми анкерами, доля всех расслоений составляет 16 %. На участках расширений – в камерах разворота самоходного транспорта и на узлах

Так, с ростом содержания глины в 2-х метровой толще кровли с 4,5 до 47 %, уменьшением мощности защитной пачки с 29 см до 18 см скорость смещения кровли возрастает в 3-6 раз. Также установлено, что даже сравнительно небольшое увеличение пролета выработки может способствовать вовлечению во взаимодействие более слабых пород кровли, расположенных на большем расстоянии от контура, и тем самым увеличить скорость смещения кровли в несколько раз.

Анализ геологических данных выемочного столба лавы № 10 в рудника 4 РУ показал, что в районе камер разворота самоходного транспорта № 6 и № 7 наблюдается зона с аномально высоким содержанием глинистых прослоек, которая прослеживается в кровле до высоты 6 м. В данной зоне установлены повышенная интенсивность деформирования выработок и увеличенная (от 3 до 6 м и более, в зависимости от их пролета) высота свода давления (свода расслоения). Отмечено, что рост данных показателей связан с увеличением содержания глинистых прослоек, снижением за счет этого агрегатной прочности ближайших к контуру пород кровли до 17 МПа и ростом уровня нагружения пород $\gamma H / \sigma_{сж} \geq 0,84$.

На основании вышеизложенного считаем необходимым для подготовительных выработок, проходимых на глубинах 800 м и более, с привязкой их кровли к 4 сильвинитовому слою высоту сводов давления (расслоения и возможного обрушения) принимать с учетом нагруженности пород и содержания глинистых прослоек в породах кровли, а также на основании анализа изменчивости геологического строения пласта. Высоту свода давления необходимо определять на практике, ориентировочно же она для сложных горно-геологических условий и больших глубин ($H > 800$ м) заложения выработок может быть принята, равной ширине выработки b либо ее эквивалентному пролету $b_{эkv}$.

Список использованных источников

1. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. – Солигорск, 2018. – 204 с.
2. Константинова, С.А. Деформируемость соляных пород в окрестности выработок глубоких горизонтов Солигорских калийных рудников / С.А. Константинова, В.А. Мисников, Э.Ф. Житков. – Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1987. – № 6. – С. 30-33.
3. Мисников, В.А. О формах и особенностях проявления горного давления в окрестности незакрепленных одиночных выработок Солигорских калийных рудников / В.А. Мисников // Совершенствование разработки калийных месторождений: Межвуз. сб. науч. тр. / Перм. политехн. ин-т; редкол.: А.Е. Красноштейн (гл. ред.) и др. – Пермь, 1987. – С. 48-54.
4. Ерохин, К.А. Проблемы поддержания подготовительных выработок Старобинского калийного месторождения в особо неустойчивых породах на больших глубинах / К.А. Ерохин, В.А. Мисников // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. материалов 15-ой Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики: в 4 т., Минск – Тула – Донецк, 29-30 окт. 2019 г. / БНТУ, ТулГУ, ДонНТУ. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 62-70.
5. Мисников, В.А. Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных выработок калийных рудников в мелкослоистых породах на больших глубинах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.04 / В.А. Мисников; Тул. политехн. ин-т. – Тула, 1991. – 17 с.

6. Ногин, П.П. Закономерности процесса деформирования горных выработок на Солигорских калийных рудниках и инженерный метод расчета срока их службы вне зоны влияния очистных работ / П.П. Ногин, Б.И. Петровский, В.А. Губанов. – Горная механика, 2003. – № 1. – С. 48-54.

7. Журавков, М.А. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных пород / М.А. Журавков, М.Д. Мартыненко. – Минск: Універсітэцкае, 1995. – 255 с.

Информация об авторах

Ерохин Кирилл Андреевич – магистр технических наук, аспирант Белорусского национального технического университета, научный сотрудник Научно-производственного унитарного предприятия «Институт горного дела» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: sigd@list.ru. ORCID: 0000-0002-6358-9241.

Лутович Евгений Анатольевич – магистр технических наук, заведующий горным отделом Научно-производственного унитарного предприятия «Институт горного дела» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: sigd@list.ru.

Information about the authors

Erokhin Kirill Andreevich – Master (Engineering), Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, Researcher, Scientific Production Unitary enterprise “Institute of Mining” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: sigd@list.ru. ORCID: 0000-0002-6358-9241.

Lutovich Yauheni Anatolievich – Master (Engineering), Head of mining department, Scientific Production Unitary enterprise “Institute of Mining” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: sigd@list.ru.

Поступила в редакцию 19.06.2020 г.

УДК 691.32:620.193.4:539.219.3

Хорольский А.А., Гринев В.Г.*Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины, г. Днепр, Украина***РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОДХОДА
ДЛЯ ВЫБОРА СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ВЫРАБОТОК**

Аннотация. В статье предложен новый подход, который предусматривает применение графов и сетевых моделей, а также алгоритмов оптимизации для проектирования процесса крепления выработанного пространства. Установлено, что повышение эффективности сооружения выработок можно рассматривать как распределительную задачу, суть которой заключается в учете многообразия факторов, которые различны по своей природе и степени влияния, поэтому был применен декомпозиционный подход. Применение описанных подходов позволяет оптимизировать процесс сооружения выработок по одному из параметров, а применение описанного программного обеспечения позволяет внедрить результаты в производство.

Ключевые слова: горная выработка, крепление, потоки ресурсов, эффективность, надежность, себестоимость, сетевая модель, программное обеспечение.

Khorolskyi A.O., Hrinov V.H.*Institute for Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine,
Dnipro, Ukraine***DEVELOPMENT OF A NEW TECHNOLOGY FOR SELECTION
OF THE METHOD OF THE WORKED-OUT SPACE FASTENING**

Abstract. The article describes a new approach to determining the optimal parameters of the process of constructing workings conditions. It has been established that the design of the technology for securing the workings consists in determining the totality of the processes of manufacturing, transportation, construction of temporary and permanent fastening that are interconnected in time and space. The paper proposes a model for finding the optimal type of fastening from the position of minimizing the cost of construction and maintenance of workings. The idea is to present the stages for the construction of workings in the form of a network model and the use of dynamic programming algorithms to optimize the process at each intermediate stage. This allows to move from diversity (by nature) to priority control factors that affect the efficiency of the process – in this way, optimization of the parameters of the workings construction process is achieved.

Keywords: mine working, roofbolting, resources flows, efficiency, reliability, cost price, network model, software.

Введение. Процесс проектирования технологии крепления выработанного пространства весьма сложная задача, которая направлена не только на предотвращение деформации массива горных пород, но и борьбу с негативными явлениями: водопритоками, пучением пород почвы и др. При этом, конечная эффективность определяется не только надежностью, но и затратами на крепление 1 погонного метра выработки. Выделим несколько факторов, которые значительно затрудняют процесс проектирования:

- во-первых, на стадии проектирования следует учесть множество факторов, иногда десятки, которые определяют тип крепления, при этом степень значимости рассмотренных факторов различна и не всегда является определяющей на том или ином этапе крепления, т.е. необходимо учесть многообразие различных по природе параметров;

- во-вторых, необходимо определиться, что является критерием эффективности на стадии проектирования технологии крепления выработанного пространства; это позволит не только оптимизировать параметры процесса, но и оценить возможности от внедрения новой технологии;

- в-третьих, необходимо, чтобы предложенное решение давало однозначный ответ, а также учитывало, как технологические параметры (в виде порядка возведения, транспортировки, демонтажа крепления) так и экономические (в виде стоимости материалов, оборудования, оплаты труда);

- в-четвертых, необходимо наличие инструмента, который позволяет автоматизировать процесс принятия решений и систематизировать данные.

Все рассмотренные выше факторы свидетельствуют о том, что представленное исследование является актуальным. Таким образом, для решения задачи об эффективном выборе способа и технологии крепления выработанного пространства необходимо ответить на ряд вопросов. Как учесть многообразие факторов, которые влияют на тип крепления? Что является критерием эффективности на стадии выбора крепления? Как учесть технологические возможности на предприятии? Какой инструментарий можно использовать для решения поставленных задач? Ответам на эти вопросы посвящено предложенное исследование.

Таким образом, разработка научных основ проектирования технологии крепления выработанного пространства с учетом пространственно-технологических взаимосвязей является актуальной научной задачей.

В связи с этим целью работы является разработка нового подхода для проектирования процесса крепления выработанного пространства. Для этого необходимо:

- во-первых, проанализировать существующие методы принятия решений в горном деле;

- во-вторых, на основе выбранного подхода, разработать модель, которая отражает технологию возведения крепи;

- в-третьих, предложить систему поддержки принятия решений.

Сам процесс крепления выработанного пространства представляет собой технологическую схему, т.е. это графическое модельное представление технологического процесса в виде последовательных производственных функций, технологических и транспортных операций [1]. Из этого определения следуют основные требования к подходу: универсальность, учет многообразия связей, возможность оптимизации параметров. Условно подходы по принятию решений при проектировании технологических схем можно разделить на информационные и оптимизационные. Такое распределение осуществлено на основе конечного результата. В работе [2] представлен подробный анализ каждого из подходов. Информационный подход дает ответ на вопрос: какое решение является наиболее предпочтительным и базируется на экспертных оценках. А оптимизационный подход дает ответ на вопрос: какое решение является наиболее целесообразным с экономической или технологической точки зрения. Информационный подход предусматривает выделение критериев на стадии проектирования, проведения экспертной оценки и сравнение вариантов между собой. В результате получаем ответ: какое из решений является предпочтительным. Однако неизвестно, насколько оно будет «преимуществом», если будут другие критерии оптимальности. Приведенная группа подходов действенна на стадии проектирования, однако для действующих предприятий необходимо применить более «чувствительные» инструменты.

Оптимизационные подходы делятся, в первую очередь, по целевой функции критериев на методы математического программирования, которые отличаются процедурой принятия решений на линейное, квадратичное, целочисленное, геометрическое,

стохастическое, динамическое программирование; детерминированные модели, вероятностные модели. Если методы математического программирования дают ответ на вопрос: какое решение является оптимальным, то детерминированные модели демонстрируют соотношение между параметрами, формируют способ отображения – это корреляционные соотношения [3] или графическое представление [4]. Вероятностные модели базируются на понятии «надежность» [5], то есть способность системы воспроизводить заданный уровень производительности во времени в соответствии с накладываемыми ограничениями [6].

Группа оптимизационных подходов [3-6] действительна на стадии оперативного управления производством, однако необходимо из этого многообразия выбрать наиболее предпочтительный с точки зрения возможности его визуализации, а также формирования «банка проектных решений». По нашему мнению, для этого могут быть применены графы и сетевые модели [7]. В работе [8] дано обоснование выбранного метода с позиции оптимальности проектирования. Мы лишь отметим, что само определение «граф» уже предусматривает упорядоченность структуры, демонстрирует многообразие связей, а также позволяет воспользоваться алгоритмами оптимизации на сетях и графах [9] для принятия решений.

Таким образом, применение графов и сетевых моделей позволяет нам предложить новый подход к проектированию технологических схем крепления выработанного пространства. В результате этого можно будет оптимизировать конкретную технологию по одному из предложенных параметров, а применение предложенного программного обеспечения позволит внедрить результаты в производство.

Методы исследования. Разработка нового подхода для проектирования процесса крепления выработанного пространства предусматривает ряд определений, без уточнения которых нельзя будет перейти к изложению методики исследования.

Способ – прием, действие, метод, применяемые при исполнении какой-нибудь работы, при осуществлении чего-нибудь [10]. Следовательно, способ крепления выработки направлен на поддержание выработанного пространства и реализуется последовательностью определенных этапов.

Этап – отдельный момент, период в какой-либо деятельности, который по своему характеру и результатам отличается от предыдущих и последующих периодов этой деятельности [11]. Таким образом, необходимо независимо от способа крепления выработанного пространства установить общие этапы, которые будут влиять на параметры технологической схемы.

Параметр – величина, характеризующая основные существенные особенности процессов или объектов [12]. Из этого следует, что сам параметр может быть оптимизируемым с целью повышения эффективности.

Эффективность – связь между достигнутым результатом и использованными ресурсами [13]. Это определение подразумевает поиск баланса между затраченными средствами и конечной эффективностью. В случае с креплением это целесообразность.

Целесообразность – соответствие явления или процесса определенному состоянию, материальная или идеальная модель которого выступает в качестве цели; форма проявления причинно-следственных отношений [14].

Принятые определения позволили нам сформировать следующий порядок действий, который состоит в установлении критерия эффективности крепления, выявлении общих этапов на стадии возведения крепления независимо от типа крепления, построении модели, предложении системы поддержки принятия решений.

При выборе крепления пользуются показателем целесообразности [15], который учитывает вероятностную надежность и вероятностную эффективность [16]:

$$k_{\text{д}} = V + k_{\text{эф}},$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент целесообразности типа крепи;

V – вероятностная надежность крепления;

$k_{\text{эф}}$ – вероятностная эффективность крепления.

При этом, если вероятностная надежность крепления определяется только из опыта на основе наблюдений за количеством вывалов и обрушения пород, то вероятностная эффективность характеризуется соотношением между стоимостью закрепления 1 погонного метра выработки предложенным креплением к стоимости закрепления 1 погонного метра другим или эталонным видом крепления. Стоит также отметить, что на стадии проектирования значение V всегда стремится к 1, т.к. каждый стремится к повышению надежности, поэтому следует более внимательно относиться к показателю вероятностной эффективности. Последняя учитывает технологию сооружения выработок, позволяет оптимизировать параметры эксплуатации и может определяться по формуле:

$$k_{\text{эф}} = \frac{Q_{\text{min}}}{Q_{\text{ет}}}, \quad k_{\text{эф}} \rightarrow 1,$$

где Q_{min} – стоимость крепления 1 погонного метра (пог. м) выработки;

$Q_{\text{ет}}$ – стоимость крепления 1 пог. м выработки эталонным или другим видом крепления.

Из этого следует, что при $k_{\text{эф}} < 1$ крепь целесообразно применять, а при $k_{\text{эф}} \geq 1$ – нецелесообразно.

Следовательно, на стадии проектирования крепления выработанного пространства следует учитывать как организационные моменты, связанные с технологией, которые определяют надежность закрепления выработанного пространства, так и экономические, которые непосредственно сказываются на общей эффективности процесса. Проблема осложнена многообразием параметров, которые различны по природе, а также степени задействования во времени. К примеру, никто не будет отрицать, что необходимо организовать быструю доставку крепежных материалов в забой, но, в то же время, важно и правильно организовать технологию возведения временной крепи, а, кроме этого, снова необходимо организовать технологию доставки горной массы из забоя и т.д. Таким образом, на процесс возведения крепи влияют факторы, не связанные между собой непосредственно (доставка материалов, крепление, вывод горной массы и т.д.). При этом, если оптимизация одной целевой функции может быть представлена в формате линейного программирования, двух параметров – поверхностью, то для множества параметров – это n -мерное пространство (где n – число параметров), которое на данном этапе невозможно решить. Поэтому, нами предложено для решения этой задачи использовать декомпозиционный подход [17, 18].

Сущность декомпозиционного подхода заключается в выделении цели нижних уровней по иерархии с цели верхнего уровня. Таким образом, после этого каждый из определенных факторов разлагается на меньшие факторы, то есть происходит переход от большего к меньшему, а достижение конечной цели происходит за счет анализа и оптимизации параметров на начальных этапах. Происходит переход от решения общей n -мерной задачи, к частной, более низко стоящей на иерархии (одномерной) задаче, что позволяет сэкономить вычислительные ресурсы.

Для оптимизации процесса сооружения выработок в качестве оптимизируемого параметра можно принять стоимость закрепления 1 погонного метра длины выработанного пространства. Также можно оптимизировать и по трудовым затратам, по материа-

лоемкости, времени на возведение и т.д. Главное условие решения этой задачи – взаимосвязь всех этапов между собой.

Применение графов и сетевых моделей позволяет решить указанную задачу.

Результаты исследования. Независимо от материала крепления (рамно-податливое, набрызгбетонное, анкерное и т.д.) установлено наличие общих этапов, которые подразумевают ряд локальных задач. Рассмотрим этапы решения этих задач (таблица 1).

Таблица 1. – Этапы решения задач сооружения выработок

Этап	Название этапа	Задача	Суть решения задачи
I	погрузка крепи на поверхности	необходимо организовать технологию, чтобы сократить затраты на перемещение	необходимо сбалансировать потоки входных и выходных ресурсов, а также решить задачу размещения в пространстве поставщиков материалов и потребителей
II	доставка крепи по выработкам с учетом складских затрат	необходимо организовать технологию, чтобы сократить затраты на хранение и ликвидировать временные простои	необходимо сбалансировать в пространстве взаимосвязи между поверхностным комплексом предприятия, складами, подземными выработками, забоями
III	подготовительные работы (бурение шпуров и т.д.)	необходимо организовать технологию, чтобы сократить затраты на проведение подготовительных работ и сократить временные затраты	необходимо выбрать бурильное, монтажное и др. оборудование с минимальной удельной себестоимостью, а также сократить количество горной массы, которая появляется в результате подготовительных работ
IV	возведение временного крепления	необходимо спроектировать технологию так, чтобы достигалась экономия материалов, а также снизились временные затраты на монтаж-демонтаж временной крепи	необходимо обосновать способ возведения временной крепи с минимальной материалоемкостью, минимальными простоями, минимальным количеством выдаваемой горной массы
V	возведение постоянного крепления	необходимо спроектировать технологию так, чтобы достигалась экономия материалов, а также снизились временные затраты на монтаж-демонтаж постоянной крепи	необходимо обосновать способ возведения постоянной крепи с минимальной материалоемкостью, минимальными простоями, минимальным количеством выдаваемой горной массы
VI	выемка и транспортировка горной массы вследствие проведенных работ	необходимо спроектировать технологию так, чтобы сократились временные простои, связанные с уборкой горной массы из забоя, и минимизировать себестоимость	необходимо организовать работу погрузочно-доставочного оборудования, средств транспортировки, сбалансировать во времени потоки горной массы
VII	извлечение крепи	необходимо организовать технологию так, чтобы временные затраты были минимальными	необходимо обосновать технологию демонтажа с минимальной затратай временных и человеческих ресурсов

Как видно из таблицы 1 все этапы универсальные и не зависят от типа крепления, тем не менее, каждый из рассмотренных этапов также может быть разбит на этапы и оптимизирован. У всех перечисленных выше задач суть решения сводится к минимизации параметров. Для этого необходимо представить весь цикл крепления выработанного пространства в виде сетевой модели, где вершинам будут соответствовать опреде-

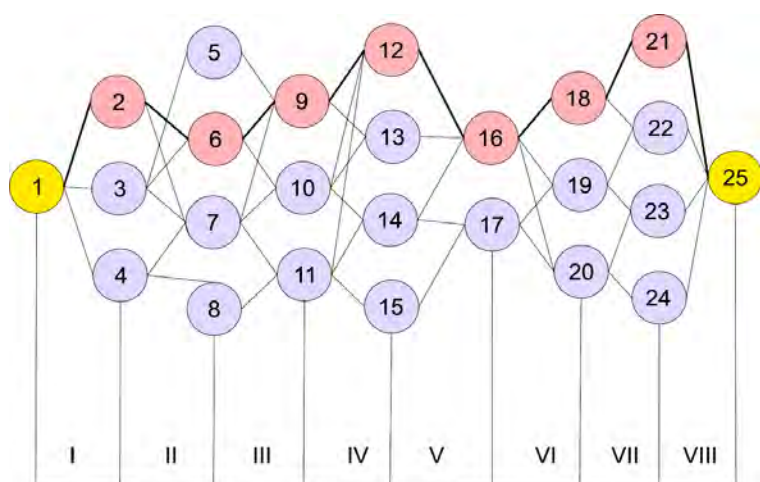


Рисунок 1. – Сетевая модель для определения оптимальных параметров сооружения выработки

ленные альтернативы, технологии, а расстоянию между этими вершинами – значение оптимизационного параметра. Изобразим на рисунке 1 сетевую модель процесса сооружения выработки.

Приведем в таблице 2 пояснения к сетевой модели, изображенной на рисунке 1.

Тогда задача нахождения оптимального решения сводится к поиску кратчайшего маршрута от вершины 1 (начало) к конечной вершине (в нашем случае 25).

Таблица 2. – Сетевая формализация задачи сооружения выработок

Обозначение этапа на рисунке 1	Название этапа	Начальная вершина	Конечная вершина (вершины на промежуточных этапах)	Интерпретация
I	погрузка крепи на поверхности	1	2-4	1 – вершина для начала отсчета; 2-4 – варианты технологии транспорта
II	доставка крепи по выработкам с учетом складских затрат	2	5-8	2 – оптимальная технология после первого этапа; 5-8 – технологии транспорта
III	подготовительные работы (бурение шпуров и т.д.)	6	9-11	6 – оптимальная технология после двух этапов; 9-11 – технологии бурения
IV	возведение временного крепления	9	12-15	9 – оптимальная технология после трех этапов; 12-15 – варианты технологии возведения временного крепления
V	возведение постоянного крепления	12	16-17	12 – оптимальная технология после четырех этапов; 16-17 – технологии крепления
VI	выемка и транспортировка горной массы вследствие выполненных работ	16	18-20	16 – оптимальная технология после пяти этапов; 18-20 – технологии транспорта
VII	извлечение крепи	18	21-24	18 – оптимальная технология после шести этапов; 21-24 – технологии демонтажа
VIII	завершение	21	25	21 – оптимальная технология после семи этапов; 25 – завершение

Для наглядности мы кратчайший маршрут изобразили утолщенной линией, а вершины, в которых достигаются оптимальные решения на промежуточных этапах, выделили другим цветом (розовым).

Необходимым условием является соответствие расстояния между вершинами (ребрами сетевой модели) реальным производственным взаимосвязям, т.е., если существует взаимосвязь между точками (вершинами) 2 и 6, а также 2 и 7, то расстоянию между этими вершинами соответствует значение оптимизационного параметра, а в случае, если взаимосвязь между вершинами отсутствует (к примеру, между 2 и 8, 2 и 5), то значение параметра принимаем равным бесконечности.

Таким образом, задача выбора способа крепления выработок решается в следующей последовательности:

- во-первых, необходимо выбрать критерий эффективности при выборе способа, к примеру – себестоимость производства крепления 1 пог. м выработки;
- во-вторых, необходимо выделить этапы в технологии возведения крепления;
- в-третьих, для каждого решения на этапе определить значение оптимизационного параметра (в нашем случае – себестоимость производства крепления 1 пог. м выработки);
- в-четвертых, представить совокупность альтернативных решений в виде сетевой модели, где вершинам соответствуют альтернативы, а расстоянию между ними – значение оптимизационного параметра;
- в-пятых, найти кратчайшее расстояние от начальной до конечной вершины, которое будет соответствовать оптимальному решению.

Обсуждение результатов. Описанная выше методология выбора способа крепления выработок может быть реализована в указанной последовательности с помощью системы поддержки принятия решений.

Институтом физики горных процессов НАН Украины разработано специализированное программное обеспечение [8], которое может быть инструментом для решения задач в данном направлении. Фрагмент рабочего окна программы представлен на рисунке 2.

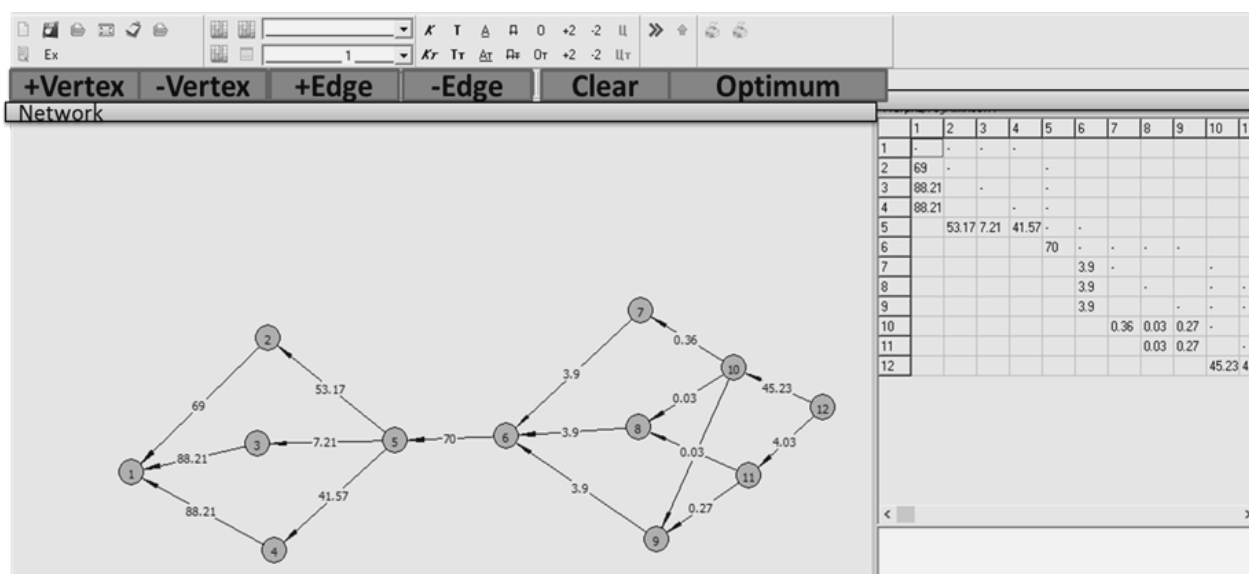


Рисунок 2. – Фрагмент рабочего окна программы

В работе [19] приведены практические результаты и возможности использования данного программного обеспечения.

При этом, программа позволяет находить кратчайший путь (оптимальную стратегию) на каждом этапе, задав возможные варианты технологии крепления выработки. Область применения не ограничивается затронутыми в данной работе вопросами, а прежде всего, направлена в сторону исследования технологических аспектов физики горных процессов – явлений, когда существует взаимообратная связь между технологией ведения работ и поведением массива горных пород и наоборот.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку «банка проектных моделей», которые состоят из уровней:

- «тип крепи» (анкерная, набрызгбетонная, рамно-анкерная и др.);
- «технология ведения работ», т.е., зная тип крепи, можно анализировать технологические циклы, при этом учитывать перспективные технологии по организации работ;
- «оборудование» – предусматривается оценка взаимосвязи между доставочным, вспомогательным оборудованием;
- «материалы» – необходимый уровень, который позволяет оценить затраты по организации технологии крепления с применением указанного материала;
- «трудоемкость», учитывается уровень временных затрат и человеческого ресурса.

При этом стоит отметить, что сам «банк проектных моделей» может формироваться непосредственно проектировщиком для конкретных условий функционирования предприятия, а удобная форма интерпретации позволит спустя время вернуться к процессу принятия решения.

Выводы. В работе предложен новый подход, который позволяет оптимизировать параметры сооружения выработок. В процессе реализации поставленной задачи и проведения исследования было установлено:

- на стадии выбора крепи внимание стоит уделять не только повышению надежности, но и общей эффективности, которая выражается соотношением затрат на крепление выработанного пространства к реализованному эффекту, что позволяет обосновать критерий целесообразности крепи и задать ему область применения;
- на процесс выбора способа крепления оказывают влияние технологические особенности предприятия (транспортные цепочки, сеть выработок, имеющееся оборудование), для учета этих особенностей следует представить возможные варианты в виде сетевой модели, где каждой вершине соответствуют альтернативы, а расстоянию между вершинами – значение оптимизационного параметра;
- на эффективность выбора способа крепления влияют параметры, разные по природе и степени воздействия. Во избежание этой проблемы предложен декомпозиционный подход, суть которого заключается в выделении цели нижних уровней по иерархии с цели верхнего уровня по иерархии. После этого каждый из определенных факторов разлагается на меньшие факторы, то есть, происходит переход от большего к меньшему, а достижение конечной цели происходит за счет анализа и оптимизации параметров на начальных этапах;
- в работе предложена новая методология поиска оптимального решения, описан алгоритм принятия решения, а также приведены средства поддержки принятия решений на стадии проектирования.

Список использованных источников

1. Порцевский, А.К. Выбор рациональной технологии добычи руд. Геомеханическая оценка состояния недр. Использование подземного пространства. Геоэкология / А.К. Порцевский. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 767 с.
2. Hrinov, V.G. Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment / V.G. Hrinov, A.O. Khorolskyi // E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering. – 2018. – № 60. – P. 1-10.
3. Khorolskyi, A. Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development / A. Khorolskyi, V. Hrinov, O. Kaliushenko // Procedia Environmental Science, Engineering and Management. – 2019. – Т. 6, № 3. – P. 463-471.
4. Methodical and Applied Aspects of Hydrodynamic Modeling of Options of Mining Operation Curtailment / I. Sadovenko [etc.] // Solid State Phenomena. – 2018. – № 277. – P. 36-43.
5. Дружинин, Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем / Г.В. Дружинин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
6. Гринев, В.Г. Проектирование технологических схем очистного оборудования с использованием сетевых моделей: опыт и перспективы / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 4. – С. 12-21.
7. Хорольский, А.А. Обоснование параметров выбора очистного оборудования с учетом области рациональной эксплуатации / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2017. – № 40. – С. 139-144.
8. Гринев, В.Г. Система поддержки принятия решений при разработке месторождений полезных ископаемых / В.Г. Гринев, А.А. Хорольский // Горно-геологический журнал. – 2017. – № 3 (51) - 4 (52). – С. 18-24.
9. Vapat Ravindra, B. Graphs and Matrices / B. Vapat Ravindra. – London, 2014. – 193 p.
10. Ожегов, С.И. Толковый словарь русского языка / С.И. Ожегов, Н.Ю. Шведова. – М.: Издательство «Азъ», 1992.
11. Прохоров, А.М. Большой энциклопедический словарь / А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1993. – 1632 с.
12. Лугинский, Я.Н. Англо-русский словарь по электротехнике и электроэнергетике: ок. 45000 терминов / Я.Н. Лугинский, М.С. Фези-Жилинская, Ю.С. Кабилов. – 2-е изд. – М.: РУССО, 1995. – 616 с.
13. Глава 191 Международного электротехнического словаря: Надежность и качество услуг: Международный стандарт СЕІ ІЕС 50 (191). [ОСТ 45.127-99]. – 01.12.1990. – Международная электротехническая комиссия.
14. Дедю, И.И. Экологический энциклопедический словарь / И.И. Дедю. – Кишинев: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии, 1989. – 406 с.
15. Kumar, R. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings / R. Kumar, S.C. Kaushik // Building and environment. – 2005. – № 40 (11). – P. 1505-1511.
16. Виноградов, Ю.А. Разработка программного обеспечения для повышения эффективности поддержания выработок в сложных гидрогеологических условиях / Ю.А. Виноградов, А.А. Хорольский // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 5-11.

17. Хорольский, А.А. Сетевые модели как инструмент повышения организационно-технологической надежности производства / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Инновационные технологии в образовании, науке и производстве: материалы V Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Минск, 18-19 нояб. 2017 г., секция Информационные технологии в производстве и научных исследованиях [Электронный ресурс] / БНТУ. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/36360>. – Дата доступа 13.07.2020.

18. Models and methods to make decisions while mining production scheduling / A. Khorolskyi [etc.] // Mining of Mineral Deposits. – 2019. – № 13 (4). – P. 53-62.

19. Хорольский, А.А. Выбор сценария освоения месторождений полезных ископаемых / А.А. Хорольский, В.Г. Гринев // Геология и охрана недр. – 2018. – № 3 (68). – С. 68-75.

Информация об авторах

Хорольский Андрей Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела управления состоянием горного массива, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ул. Симферопольская, 2а, 49005, г. Днепр, Украина), e-mail: khorolskiyaa@ukr.net.

Гринев Владимир Герасимович – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией проблем разработки месторождений, Институт физики горных процессов Национальной академии наук Украины (ул. Симферопольская, 2а, 49005, г. Днепр, Украина), e-mail: grinevv@ukr.net.

Information about the authors

Khorolskyi Andrii Oleksandrovych – Ph. D. (Engineering), Senior researcher, the Department of Rock Mass State Control, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine) (2a, Simferopolskaya Str., 49005, Dnipro, Ukraine), e-mail: khorolskiyaa@ukr.net.

Hrinov Volodymyr Herasymovych – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Laboratory, Institute for Physics of Mining Processes NAS of Ukraine (IPMP, NAS of Ukraine) (2a, Simferopolskaya Str., 49005, Dnipro, Ukraine), e-mail: grinevv@ukr.net.

Поступила в редакцию 13.07.2020 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.363.2:620.176.05(045)(476)

Басалай Г.А., Казаченко Г.В.*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ В ЛАБОРАТОРИИ**

Аннотация. *Рассмотрен процесс исследования нагрузок при резании соляных пород на гидравлическом стенде с использованием измерительной системы, управляющей процессом регистрации и обработки данных экспериментов с помощью программного обеспечения PowerGraph. Приведены зависимости для вычисления нагрузок на звенья стенда.*

Ключевые слова: *резание соляных пород, измерительная схема, эксперимент.*

Basalai R.A., Kazachenko G.V.*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***SOME PARAMETERS OF THE CUTTING PROCESS OF SALT ROCKS
IN LABORATORY TESTS**

Abstract. *The article considers a process of studying the loads when cutting salt rocks on a hydraulic bench using a measuring system that controls the process of registration and processing of experimental data using the PowerGraph software. Dependencies for calculating loads on the stand links are given.*

Keywords: *cutting of salt rocks, measuring scheme, experiment.*

Введение. Энергетические затраты на разрушение горных пород резанием определяются большим числом факторов, основными из которых являются прочностные свойства пород и кинематические характеристики процессов снятия стружки при резании. Прочностные свойства массива горной породы характеризуют рядом критериев, среди которых в горном деле имеет наибольшее влияние коэффициент крепости, предложенный в свое время профессором М.М. Протодяконовым [1]. Этот коэффициент определяется обычно опытным путем и в зависимости от состояния породы различными способами [2]. Более того, его определение регламентируется стандартами. Еще более различными способами и зависимостями оценивается геометрия и кинематика процессов разрушения горных пород при резании [3]. Необходимо заметить, что в основе определения прочностных свойств пород лежат экспериментальные исследования [4], выполняемые как на натуральных образцах горного оборудования, так и на специальных лабораторных установках. В БНТУ создан и эксплуатируется стенд, который позволяет установить некоторые характеристики разрушения горных пород [5]. Некоторые возможности стенда описаны в работах [5, 6]. Вместе с тем предложенные в этих работах методики не исчерпывают все способы определения как энергетических характеристик процесса разрушения горных пород резанием, так и некоторых параметров работы самого стенда, чему и посвящена предлагаемая статья.

Методические основы исследования. Предложенные в статьях [5, 6] способы оценки энергозатрат на разрушение горных пород предполагают, что известны характеристики используемого лабораторного стенда с гидравлическим приводом. Однако их значения, определенные экспериментальным путем, в этих работах не приведены. Поэтому данные, полученные на основании результатов экспериментов на стенде (рисунок 1), обладают некоторыми погрешностями, оценка которых требует проведения дополнительных экспериментов. Анализируя схему и процесс работы стенда, замечаем, что усилие, развиваемое гидроцилиндром, тратится на преодоление силы сопротивления резанию породы и трения между передвижной платформой и направляющими механизма ее перемещения:

$$P_{\Gamma} = P_{\text{р}} + P_{\text{т}}, \quad (1)$$

где P_{Γ} – усилие на штоке гидроцилиндра;

$P_{\text{р}}$ – сила сопротивления резанию;

$P_{\text{т}}$ – сила сопротивления перемещению платформы.



Рисунок 1. – Общий вид стенда с измерительной системой

Усилие на штоке гидроцилиндра регистрируется силоизмерительным датчиком СТ-10 ООО «Тилком» и обрабатывается с помощью специализированного программного обеспечения PowerGraph или в наиболее распространенной среде Excel.

Измерительная система содержит и датчик перемещения, что позволяет регистрировать как перемещение платформы с резцом, так и ее скорость. Силу $P_{\text{р}}$ сопротивления породы резанию можно определить как разность между силой P_{Γ} на штоке и силой $P_{\text{т}}$ трения в подвижных опорах. Эту силу с учетом того, что она включает силу трения качения роликов по направляющим, а также силу трения скольжения роликов о направляющие, представим в обычной форме:

$$P_{\text{т}} = P_{\text{д}} \cdot f_{\text{д}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{д}}$ – сила давления роликов на направляющие;

$f_{\text{д}}$ – приведенный коэффициент сопротивления перемещению платформы с резцом.

Силу P_d представим в виде суммы:

$$P_d = P_{x.x} + P_n, \quad (3)$$

где $P_{x.x}$ – усилие давления платформы в холостом режиме;

P_n – усилие подачи при резании породы.

Усилие подачи резца на массив породы (лабораторный образец) принимаем пропорциональным усилию сопротивления резанию:

$$P_n = K_n \cdot P_p, \quad (4)$$

где K_n – коэффициент пропорциональности.

Тогда, используя зависимости (4, 2, 1) и пренебрегая сопротивлением холостого хода вследствие его малости, получим соотношение для определения P_p :

$$P_p = \frac{P_r}{1 + f_d \cdot K_n}. \quad (5)$$

Чтобы использовать это соотношение, необходимо знать коэффициенты f_d и K_n . Для их определения предлагается методика, которая заключается в проведении серии экспериментов при двух или более толщинах снимаемой резцом стружки. Если считать f_d и K_n постоянными, то их определение на основании экспериментов по определению силы резания при толщинах стружки h_1 и h_2 может быть найдено на основе решения системы двух уравнений равновесия для двух значений h (рисунок 2).

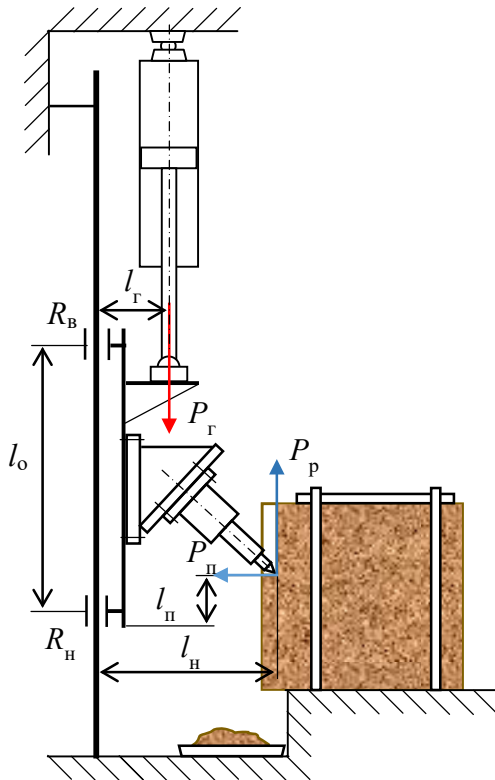


Рисунок 2. – Схема для определения нагрузок при снятии стружки

Принимая, согласно [3] $P_p = c_1 \cdot h^{c_2} \cdot S$,

$$\frac{P_{r1}}{P_{r2}} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^{c_2} \cdot \frac{S_1}{S_2}, \quad (7)$$

где P_{r1} , P_{r2} – усилия на штоке гидроцилиндра, регистрируемые датчиком СТ-10 при двух толщинах стружки;

S_1 , S_2 – площади поперечных сечений стружки, снимаемой резцом при толщинах h_1 и h_2 ;

c_1 – коэффициент, зависящий в основном от прочности породы;

c_2 – показатель степени в зависимости удельных затрат мощности от толщины стружки.

Из (6) находим

$$1 + f_d \cdot K_n = \frac{P_{r2} - P_{r1}}{P_{p2} - P_{p1}}. \quad (8)$$

Показатель c_2 и коэффициент c_1 находятся по методике, изложенной в работе [5],

а c_2 может быть определен также и при обработке данных двух опытов. Из рисунка 2 и (7) следует также соотношение:

$$\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{c_2} = \frac{S_2 \cdot P_{r1}}{S_1 \cdot P_{r2}}, \quad (9)$$

которое позволяет определить показатель степени c_2 , поскольку все величины, кроме c_2 , в левой и правой частях измеряются в опытах.

Площади S_1, S_2 сечений могут быть найдены по следующей зависимости:

$$S = \frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot l}, \quad (10)$$

где m_1, m_2 – массы образцов до и после эксперимента;

ρ – плотность образцов породы;

l – длина реза.

Усилия на штоке гидроцилиндра P_r регистрируются измерительной системой по сигналам датчика СТ-10.

Таким образом определены все величины, необходимые для вычисления произведения ($K_n \cdot f_d$).

Как показывает анализ данных, полученных в опытах, произведение ($K_n \cdot f_d$) в проведенных опытах практически не меняется, что подтверждает гипотезу об их постоянстве. В связи с этим возникает вопрос об определении значений K_n и f_d в отдельности. Тем более, что в различных энергетических и прочностных расчетах горных машин и оборудования необходимо использовать коэффициент K_n . В первом приближении коэффициент K_n может быть найден из уравнений равновесия передвигаемой платформы с резцом. Для его определения приравняем нулю сумму моментов относительно центра нижней опоры платформы (рисунок 2):

$$-R_v \cdot l_o - P_r \cdot l_r + P_p \cdot l_n + P_n \cdot l_n = 0, \quad (11)$$

где R_v, R_n – реакции верхней и нижней опор платформы:

$$R_v = P_n \frac{l_n}{l_o} = K_n \cdot P_p \frac{l_n}{l_o}; \quad R_n = K_n \cdot P_p \frac{l_o - l_n}{l_o};$$

где l_o, l_r, l_n, l_p – плечи действия соответствующих сил относительно центра нижней опоры;

P_n – сила подачи.

С учетом этого:

$$P_r \cdot l_r - P_p \cdot l_p = K_n (P_p \cdot l_n + P_p \cdot l_n),$$

и

$$K_n = \frac{P_r \cdot l_r - P_p \cdot l_p}{2P_p \cdot l_n}. \quad (12)$$

Теперь можно, используя (9), найти:

$$f_d = \frac{P_{r2} - P_{p2}}{P_{p2} \cdot K_n}. \quad (13)$$

Заключение. Таким образом, разработанный и смонтированный стенд с измерительной системой позволяет определить ряд коэффициентов и параметров, необходимых при энергетических и прочностных расчетах горных машин и оборудования. Для

этого достаточно измерять две величины: силу давления штока гидроцилиндра на платформу с установленным на ней резцом и перемещение этой платформы. Определение коэффициентов пропорциональности между силами резания и подачи позволяет установить более адекватные зависимости между ними для различных параметров как самих резцов, так и их установки на платформе.

Список использованных источников

1. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я. Новик. – 4-е изд. – М.: Недра, 1984. – 359 с.
2. Смычник, А.Д. Технология и механизация разработки калийных месторождений / А.Д. Смычник, Б.А. Богатов, С.Ф. Шемет. – Минск: Юнипак, 2004. – 224 с.
3. Горные машины: учебное пособие: в 2 частях. Ч. 1: Основы теории / Г.В. Казаченко [и др.]; под общ. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Высшэйшая школа, 2018. – 183 с.
4. Солод, В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
5. Басалай, Г.А. Оценка энергоемкости резания горной породы с помощью экспериментальной установки типа динамометрического сверла / Г.А. Басалай, Г.И. Лютко, Г.В. Казаченко // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. науч. тр. 9-й междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Минск – Тула – Донецк, 29-31 окт. 2013 г. / БНТУ. – Минск, 2013. – С. 444-449.
6. Басалай, Г.А. Программно-технические средства измерения сил резания горной породы / Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2018 – № 3. – С. 55-63.

Информация об авторах

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

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.

Information about the authors

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

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.

Поступила в редакцию 13.07.2020 г.

УДК 621.869.447.43

Мрочек В.И., Мрочек Т.В., Стефаненко Д.И.

*Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь*

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА

Аннотация. В статье приводятся разработанные авторами математические модели механической подсистемы управления рабочим оборудованием фронтального погрузчика. Предложенные средства позволяют моделировать процессы функционирования механической подсистемы привода на всех возможных режимах работы: подъеме и опускании стрелы, запрокидывании и опрокидывании ковша при любой степени загрузки ковша и любых положениях стрелы. Разработанные модели могут быть использованы при определении параметров и характеристик как отдельно механической подсистемы, так и в целом системы управления рабочим оборудованием погрузчика, включающей механическую и гидравлическую части.

Ключевые слова: фронтальный погрузчик, управление, рабочее оборудование, механическая подсистема, моделирование.

Mrochek V.I., Mrochek T.V., Stefanenko D.I.

Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

SIMULATION OF THE MECHANICAL SUBSYSTEM FOR CONTROLLING THE WORKING EQUIPMENT OF A FRONT LOADER

Abstract. The article presents mathematical models of the mechanical subsystem for controlling the working equipment of a front loader. The proposed tools allow to simulate the functioning of the mechanical drive subsystem at all possible modes of operation: lifting and lowering the boom, tilting and tipping the bucket at any degree of loading of the bucket and any positions of the boom. The developed models can be used to determine the parameters and characteristics of both a separate mechanical subsystem and the entire control system of the loader's working equipment, including mechanical and hydraulic parts.

Keywords: front loader, control, working equipment, mechanical subsystem, modeling.

Введение. Фронтальные погрузчики относятся к числу наиболее распространенных строительно-дорожных машин. Повышение их технического уровня требует совершенствования применяемых методов проектирования.

Технико-экономические показатели погрузчика во многом зависят от характеристик системы управления рабочим оборудованием. Указанная система управления включает две подсистемы: механическую и гидравлическую. В работе [1] приведен анализ многочисленных схем, реализуемых в гидравлических подсистемах современных погрузчиков. Для оценки эффективности применяемых в гидравлической части технических решений необходимо проведение исследований систем управления рабочим оборудованием, рассматривая при этом совместное функционирование механической и гидравлической подсистем, что, в свою очередь, требует разработки математической модели механической подсистемы.

Математическая модель может быть использована также при определении параметров и характеристик отдельно механической подсистемы.

В известной литературе отсутствуют математические модели механических подсистем, что обусловлено сложностью используемых в них структурных звеньев. Наиболее сложным при моделировании является привод управления ковшом. Это затрудняет на этапе проектирования выбор параметров привода и оценку эффективности системы управления, включающую механическую и гидравлическую подсистемы.

При проведении данных исследований в качестве прототипа принята машина со схемой и параметрами, близкими к параметрам погрузчика Амкодор-333 (ТО-18Б) [2]. Рассматриваемая механическая подсистема содержит два привода управления: стрелой и ковшом. В приводе управления стрелой установлены два гидроцилиндра, а в приводе управления ковшом – один гидроцилиндр.

Основная часть. На рисунке 1 показана схема механического привода управления стрелой, который изображен в двух положениях стрелы (нижнем и верхнем) [3]. В нижнем положении ковш изображен в запрокинутом (на себя) состоянии, в которое он переводится после завершения операции копания. Стрела изображена в виде отрезка AC . В точке A расположен шарнир крепления стрелы к остову, а в точке C – шарнир крепления ковша к стреле. На стреле расположены также точки D и B (в точке D находится шарнир крепления гидроцилиндра к стреле). Стрелу, как правило, изготавливают из пластин криволинейной формы, причем точка D часто расположена со смещением (BD) по отношению к отрезку AC . Отрезок DF образован гидроцилиндром. В нижнем положении стрелы шток гидроцилиндра втянут, а в верхнем – полностью выдвинут. Точку F (шарнир крепления гидроцилиндра к остову) часто располагают по отношению к вертикали AE со смещением (отрезок FI).

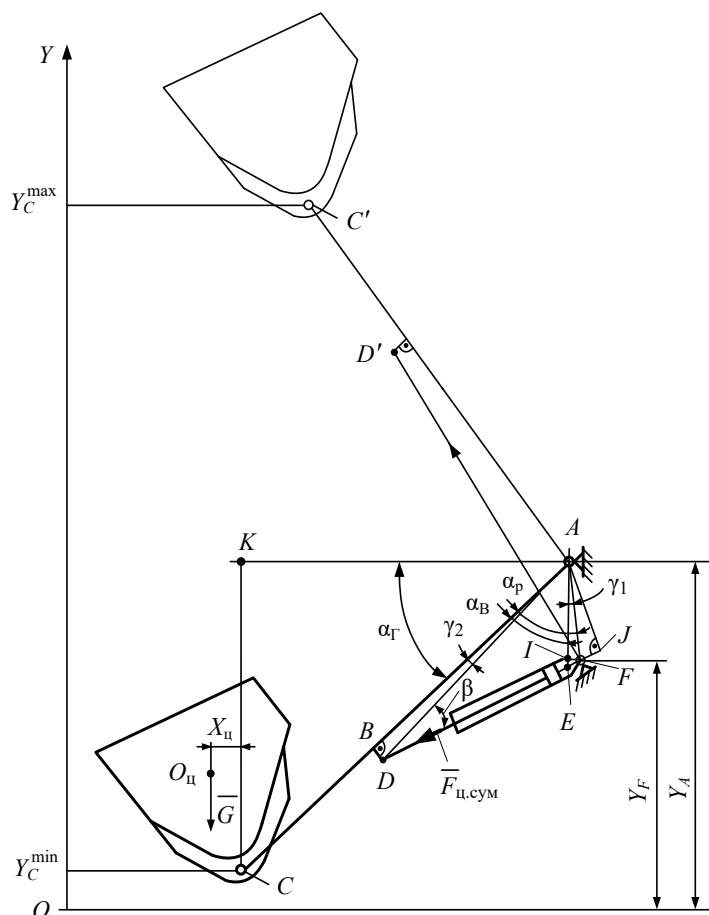


Рисунок 1. – Схема привода управления стрелой

Рассмотрим $\triangle ADF$. В этом треугольнике отрезки AD и AF являются конструктивными параметрами, постоянными при повороте стрелы. Длина отрезка DF является переменной и зависит от величины перемещения штока гидроцилиндра. Для $\triangle ADF$ справедливо равенство:

$$\sin\left(\frac{\alpha_p}{2}\right) = \sqrt{\frac{(P - AD)(P - AF)}{AD \cdot AF}}, \quad (1)$$

где α_p – расчетный угол (между отрезками AD и AF);

P – величина полупериметра $\triangle ADF$:

$$P = (AD + AF + DF)/2. \quad (2)$$

Из выражения (1)

$$\alpha_p = 2 \arcsin \sqrt{\frac{(P - AD)(P - AF)}{AD \cdot AF}}. \quad (3)$$

Из $\triangle AFI$ и $\triangle ABD$ угловые поправки:

$$\gamma_1 = \operatorname{arctg} \frac{FI}{AI}; \quad (4)$$

$$\gamma_2 = \operatorname{arctg} \frac{BD}{AB}. \quad (5)$$

Тогда угол между стрелой (отрезок AC) и вертикалью (отрезок AE):

$$\alpha_B = \alpha_p - \gamma_1 + \gamma_2. \quad (6)$$

Угол между стрелой и горизонталью (отрезок AK)

$$\alpha_\Gamma = \left| \frac{\pi}{2} - \alpha_B \right|. \quad (7)$$

При $\alpha_B < \frac{\pi}{2}$ вертикальная координата точки C , отсчитываемая от поверхности грунта:

$$Y_C = Y_A - AC \sin \alpha_\Gamma. \quad (8)$$

При $\alpha_B > \frac{\pi}{2}$:

$$Y_C = Y_A + AC \sin \alpha_\Gamma. \quad (9)$$

Длина отрезка $DF = h_0 + h$, где h_0 – длина гидроцилиндра при полностью втянутом штоке; h – координата штока гидроцилиндра (при полностью втянутом штоке $h = 0$).

При проведении силового анализа следует учитывать, что стрела с ковшом совершают вращательное движение относительно точки A . Следовательно, уравнение равновесия может быть представлено в виде:

$$\sum M_A = 0, \quad (10)$$

где $\sum M_A$ – сумма моментов сил относительно точки A .

На рассматриваемую подсистему действует приведенная сила тяжести G , приложенная в центре тяжести сечения ковша O_Π и учитывающая вес материала, ковша и стрелы.

Точка O_Π смещена по горизонтали относительно точки C на величину X_Π . Кроме силы G на стрелу действует сила $F_{\Pi, \text{сум}}$, создаваемая гидроцилиндрами. С учетом упомянутых сил уравнение (10) можно записать в виде:

$$G(X_\Pi + AC \cos \alpha_\Gamma) - F_{\Pi, \text{сум}} AJ = 0, \quad (11)$$

где AJ – плечо действия силы $F_{\Pi, \text{сум}}$ относительно точки A .

Тогда:

$$F_{\Pi, \text{сум}} = G(X_\Pi + AC \cos \alpha_\Gamma) / AJ. \quad (12)$$

Для вычисления AJ вначале из $\triangle ADF$ определим угол β , который равен:

$$\beta = 2 \operatorname{arcsin} \sqrt{\frac{(P - AD)(P - DF)}{AD \cdot DF}}. \quad (13)$$

Величина полупериметра P определяется из выражения (2). Затем для $\triangle ADJ$ запишем уравнение синусов:

$$\frac{AD}{\sin(\pi/2)} = \frac{AJ}{\sin \beta}.$$

Из последнего выражения получим:

$$AJ = AD \sin \beta. \quad (14)$$

С учетом (13) выражение (12) примет вид:

$$F_{ц.сум} = G(X_{ц} + AC \cos \alpha_T) / (AD \sin \beta). \quad (15)$$

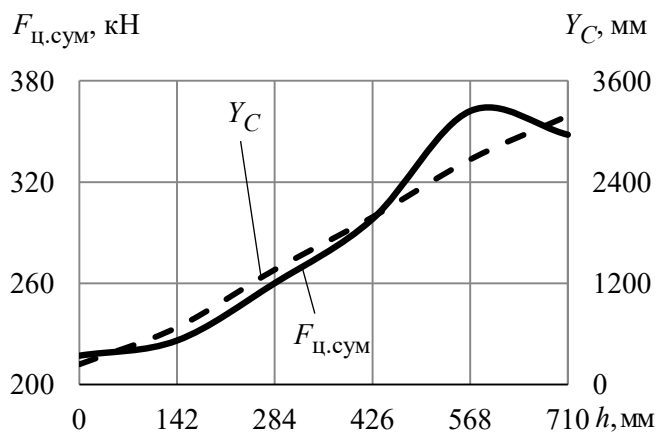


Рисунок 2. – Графики изменения вертикальной координаты \$Y_C\$ (шарнира \$C\$) и суммарной нагрузки на штоках цилиндров \$F_{ц.сум}\$ в зависимости от хода штоков цилиндров

Из \$\Delta LO_1O\$ следует:

$$\xi_1 = \arctg \frac{LO_1}{OO_1}; \quad (16)$$

$$LO = \sqrt{LO_1^2 + OO_1^2}. \quad (17)$$

Из \$\Delta LMO\$ следует:

$$\xi = 2 \arcsin \sqrt{(P_1 - MO)(P_1 - LO) / (MO - LO)}, \quad (18)$$

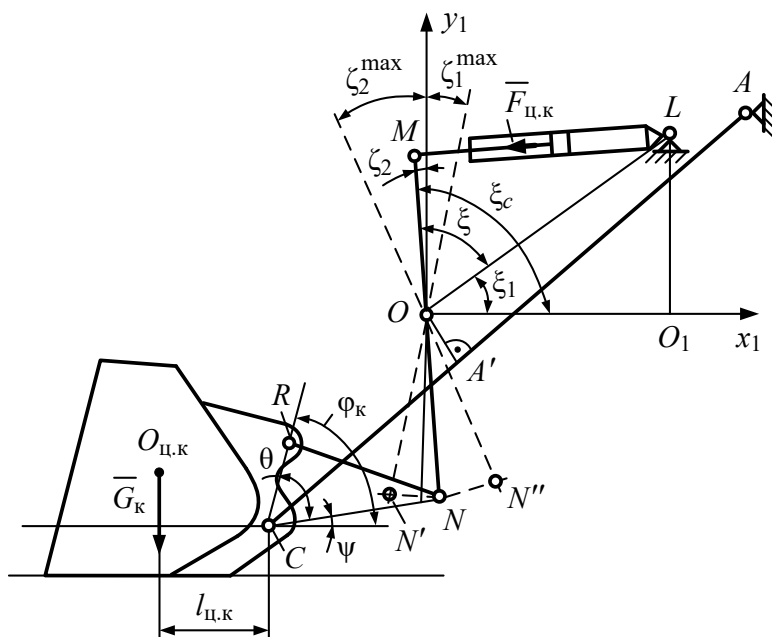


Рисунок 3. – Схема привода управления ковшем

На рисунке 2 приведены графические зависимости высоты подъема \$Y_C\$ (вертикальная координата шарнира \$C\$) и суммарной нагрузки \$F_{ц.сум}\$ на штоках цилиндров от хода штоков цилиндров \$h\$.

На рисунке 3 приведена схема привода управления ковшем. На этом рисунке днище ковша установлено на поверхности грунта горизонтально. В точке \$O\$ находится шарнир крепления рычага \$MN\$ к стреле \$AC\$. Цилиндр управления ковшем (отрезок \$ML\$) в точке \$L\$ с помощью шарнира крепится к острогом погрузчика. В точке \$O\$ расположена подвижная система координат \$Ox_1y_1\$.

где \$P_1\$ – величина полупериметра \$\Delta LMO\$:

$$P_1 = (MO + ML + LO) / 2.$$

Суммарный угол между отрезком \$MO\$ и осью \$Ox_1\$

$$\xi_c = \xi + \xi_1. \quad (19)$$

Введем систему полярных координат с полюсом в точке \$O\$ и полярной осью \$Ox_1\$. В этой системе координат положение точки \$N\$ характеризуется полярным радиусом \$\rho = |ON|\$ и полярным углом \$\varphi\$, который изменяется в пределах от \$3\pi/2 - \xi_1^{\max}\$ до \$3\pi/2 + \xi_2^{\max}\$.

В системе прямоугольных координат Ox_1y_1 :

$$\begin{aligned}x_{1N} &= \rho \cos \varphi; \\ y_{1N} &= \rho \sin \varphi,\end{aligned}\quad (20)$$

где x_{1N} и y_{1N} – координаты точки N .

При $\xi_c \leq \pi/2$:

$$\zeta_1 = \pi/2 - \xi_c; \quad (21)$$

$$x_{1N} = NO \cos(3\pi/2 - \zeta_1); \quad (22)$$

$$y_{1N} = NO \sin(3\pi/2 - \zeta_1). \quad (23)$$

При $\xi_c > \pi/2$:

$$\zeta_2 = \xi_c - \pi/2; \quad (24)$$

$$x_{1N} = NO \cos(3\pi/2 + \zeta_2); \quad (25)$$

$$y_{1N} = NO \sin(3\pi/2 + \zeta_2). \quad (26)$$

Угол наклона отрезка CN по отношению к горизонтали:

$$\psi = \arctg\left(\frac{(y_{1N} - y_{1C})}{(x_{1N} - x_{1C})}\right), \quad (27)$$

где x_{1C} и y_{1C} – координаты точки C в системе координат Ox_1y_1 .

Рассмотрим $\triangle CNR$. Длина отрезка CN равна:

$$CN = \sqrt{(x_{1N} - x_{1C})^2 + (y_{1N} - y_{1C})^2}. \quad (28)$$

Угол θ между отрезками CR и CN :

$$\theta = 2 \arcsin \sqrt{(P_2 - CR)(P_2 - CN)/(CR \cdot CN)}, \quad (29)$$

где P_2 – величина полупериметра $\triangle CNR$, $P_2 = (CR + NR + CN)/2$.

Угол наклона отрезка CR по отношению к горизонтали:

$$\varphi_k = \theta + \psi. \quad (30)$$

При $\varphi_k = \varphi_{k,0}$ днище ковша находится в горизонтальном положении. При $\varphi_k < \varphi_{k,0}$ происходит запрокидывание, а при $\varphi_k > \varphi_{k,0}$ – опрокидывание ковша. Запрокидывание ковша характеризуется углом $\varphi_{k,з}$, $\varphi_{k,з} = \varphi_{k,0} - \varphi_k$. Опрокидывание ковша характеризуется углом $\varphi_{k,оп}$, $\varphi_{k,оп} = \varphi_k - \varphi_{k,0}$.

Используя принцип возможных перемещений и пренебрегая потерями энергии в шарнирах, можно записать:

$$F_{ц,к} \Delta h_{ц} = G_k l_{ц,к} \Delta \varphi_k, \quad (31)$$

где $F_{ц,к}$ – усилие на штоке цилиндра управления ковшом;

$\Delta h_{ц}$ – элементарное перемещение штока цилиндра;

G_k – приведенная сила тяжести ковша и материала, находящегося в ковше, приложена в центре тяжести ковша с материалом $O_{ц,к}$;

$l_{ц,к}$ – плечо действия силы G_k относительно шарнира крепления ковша к стреле (точка C);

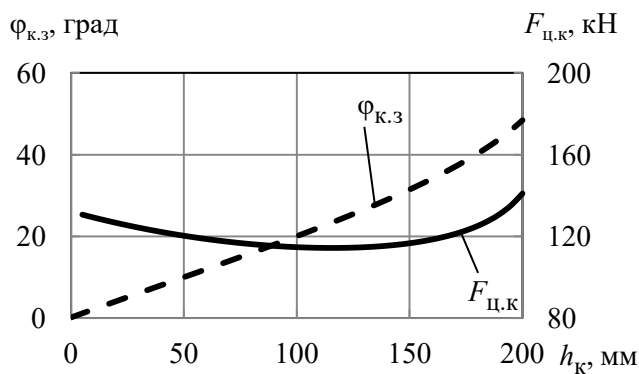


Рисунок 4. – Графики зависимостей $\varphi_{к.з}$ и $F_{ц.к}$ от хода штока цилиндра h_k

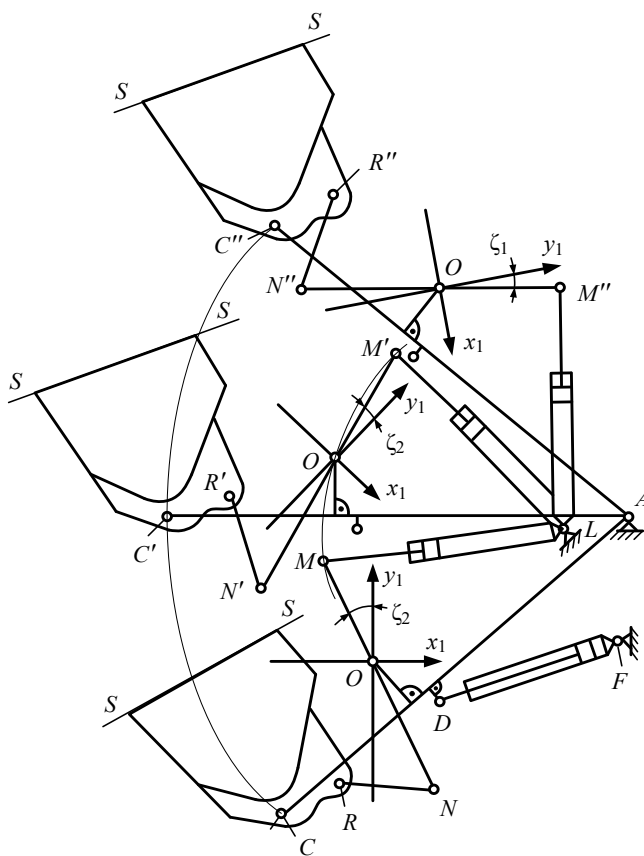


Рисунок 5. – Положения ковша при подъеме стрелы

шарниров крепления стрелы и цилиндра ковша к остову погрузчика (точки A и L).

Выводы. Разработаны математические модели, позволяющие определять параметры и характеристики механической подсистемы управления рабочим оборудованием фронтального погрузчика на всех возможных режимах работы: подъеме и опускании стрелы, запрокидывании и опрокидывании ковша при любой степени загрузки ковша и любом положении стрелы.

$\Delta\varphi_k$ – элементарное угловое перемещение ковша, соответствующее элементарному перемещению $\Delta h_{ц}$.

Из (31) усилие на штоке цилиндра

$$F_{ц.к} = G_k l_{ц.к} \Delta\varphi_k / \Delta h_{ц} \quad (32)$$

На рисунке 4 приведены графики изменения угла запрокидывания ковша $\varphi_{к.з}$ и усилия $F_{ц.к}$ в зависимости от хода штока цилиндра управления ковшем h_k . При получении указанных графических зависимостей рассматривался процесс запрокидывания ковша с сыпучим материалом, начиная от горизонтального положения (при нижнем положении стрелы). В начале процесса поршень цилиндра занимал среднее положение (полный ход штока цилиндра составлял 400 мм).

На рисунке 5 показаны положения ковша (кромки $S - S$) при подъеме стрелы. Предполагается, что подъем осуществляется при полностью выдвинутом штоке цилиндра управления ковшем. Как видно из рисунка, по мере подъема стрелы происходит поворот кромки $S - S$ в сторону опрокидывания ковша. При этом кромка $S - S$ при подъеме стрелы всегда занимает положение, при котором исключается произвольное высыпание материала из ковша.

Положение ковша (кромки $S - S$) при подъеме стрелы обусловлено различием координат

Разработанные средства могут быть использованы также для оценки эффективности технических решений, заложенных в механической и гидравлической подсистемах управления на всех операциях технологического цикла.

Список использованных источников

1. Гидравлические системы управления рабочим оборудованием и направлением движения фронтальных погрузчиков / В.И. Мрочек [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 2. – С. 77-86.

2. Погрузчик фронтальный одноковшовый Амкодор-333 (ТО-18Б). Руководство по эксплуатации / М.С. Войчинский [и др.]. – Минск: ОАО «Амкодор-Ударник», 2002. – 180 с.

3. Баловнев, В.И. Строительные погрузчики. Развитие конструкции. Устройство. Теория. Расчет. Выбор: учеб. пособие / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов, А.Г. Савельев; под научной и общей ред. проф. В.И. Баловнева. – Москва: Техполиграфцентр, 2015. – 223 с.

Информация об авторах

Мрочек Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Белорусско-Российский университет (пр-т Мира, 43, 212000, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bjd2@tut.by. ID ORCID: 0000-0001-6526-8575.

Мрочек Татьяна Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные системы управления», Белорусско-Российский университет (пр-т Мира, 43, 212000, г. Могилев, Беларусь), e-mail: mrovlad@mail.ru. ID ORCID: 0000-0002-4402-6259.

Стефаненко Даниил Игоревич – студент, Белорусско-Российский университет (пр-т Мира, 43, 212000, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bjd2@tut.by.

Information about the authors

Mrochek Vladimir Ivanovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Life Safety”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Belarus), e-mail: bjd2@tut.by. ID ORCID: 0000-0001-6526-8575.

Mrochek Tatyana Vladimirovna – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department “Automated control systems”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Belarus), e-mail: mrovlad@mail.ru. ID ORCID: 0000-0002-4402-6259.

Stefanenko Daniil Igorevich – Student, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Belarus), e-mail: bjd2@tut.by.

Поступила в редакцию 07.07.2020 г.

УДК 622.647.2.057-025.17(045)(476)

Борис Е.В., Тройнич В.А.

*ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь*

СТАТИЧЕСКИЕ ДЕЦЕНТРИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ, ВЫЗЫВАЮЩИЕ БОКОВОЙ СХОД КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ

Аннотация. *Особое влияние на эффективность работы конвейера в сложных горно-геологических условиях оказывает боковой сход ленты. В связи с этим в статье исследованы основные причины, вызывающие боковой поперечный сход ленты, предложены способы повышения самоцентрирующей способности става конвейера, даны практические рекомендации по снижению боковых перемещений ленты и уменьшению износа ее бортов.*

Ключевые слова: *конвейер, лента, роlikоопора, децентрирующие факторы, перекоc, усилие, сход ленты, угол наклона, центрирование.*

Borys Ya.V., Troinich V.A.

JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus

STATIC DECENTRING FACTORS CAUSING SIDE DISCENT OF THE CONVEYOR BELT

Abstract. *The lateral discent of the belt has a particular effect on the efficiency of the conveyor in difficult mining and geological conditions. In this regard, the article investigates the main reasons causing the lateral discent of the belt, suggests ways to increase the self-centring ability of the conveyor flight, and gives practical recommendations for reducing the lateral movement of the belt and reducing the wear of its sides.*

Keywords: *conveyor, belt, idler, decentring factors, distortion, effort, belt descent, inclination, centring.*

Введение. Уровень конвейеризации горных предприятий непрерывно растет, а освоение новых крупных месторождений, несомненно, требует широкого внедрения более мощных ленточных конвейеров и конвейерных линий большой протяженности.

Наряду со многими решенными задачами в теории ленточных конвейеров еще остаются проблемы, которые существенно влияют на работоспособность конвейерного транспорта и отдельных его узлов. Одной из таких проблем является боковой сход конвейерной ленты.

Боковым сходом конвейерной ленты называют явление, возникающее при движении конвейерной ленты по роlikоопорам става с отклонением от своего центрального положения. Анализ работоспособности ленточных конвейеров показывает, что данная проблема является одной из главных причин, приводящих к сбоям в работе конвейерных систем. Так нецентральное движение ленты нередко сопровождается повреждением дорогостоящего грузонесущего и тягового органа, что значительно уменьшает его срок службы из-за износа бортов, а так же может стать причиной аварийной ситуации, связанной с возгоранием. Зачастую возникают случаи, когда конвейер вообще не может работать в результате неустойчивого движения ленты. При всем этом боковой сход грузовой ветви значительно ограничивает производительность всего комплекса, вызывает просыпание части груза, который попадает на ленту холостой ветви и способствует заштыбовке става, нижних роликoв и барабанов конвейера.

Все эти недостатки оказывают существенное негативное влияние на технико-экономические показатели конвейерного транспорта, поэтому исследования движения ленты в боковом направлении имеют важное теоретическое и практическое значение.

Исследование поперечного движения конвейерной ленты началось еще с опытов и анализа механизма взаимодействия ленты с перекошенным роликом (А.В. Андреев, Н.Я. Биличенко, М.П. Покушаков, И.В. Запенин, В.К. Смирнов и др.). В своих работах авторы по-разному раскрывают и объясняют механизм взаимодействия ленты с роликом. Получены выражения для силы, действующей на ленту при перекосе ролика, и в известной степени описан механизм передачи этой силы в зоне контакта между лентой и роликом [1]. Данные исследования были продолжены, поскольку, сила взаимодействия во многом определяет характер поперечного движения ленты. Однако эта сила не является единственной при поперечном движении ленты, и объяснить многие виды движения ленты, основываясь только на этой силе, невозможно. В процессе эксплуатации конвейера на ленту, движущуюся по линейной части, действуют различные боковые силы. Эти силы возникают из-за следующих децентрирующих факторов: перекосов роликостропов в горизонтальной и вертикальной плоскости; отклонений става от оси конвейера; разного сопротивления вращению боковых роликов опоры; нецентральной загрузки ленты [2].

Рассмотрим усилия и моменты, возникающие в результате воздействия вышеперечисленных децентрирующих факторов, определим степень их влияния на ленту и выработаем рекомендации по внедрению.

Исследования влияния усилий, возникающих в результате воздействия децентрирующих факторов. Рассматриваемые децентрирующие факторы сравнительно медленно изменяются в пространстве и во времени, поэтому могут рассматриваться как статические. Результатом их проявления являются децентрирующие ленту усилия и моменты, для определения которых рассмотрим взаимодействие ленты и роликостропы [3].

При перекосе отдельной роликостропы в вертикальной плоскости (рисунок 1) на некоторый угол возникает децентрирующая сила P_1 [4]:

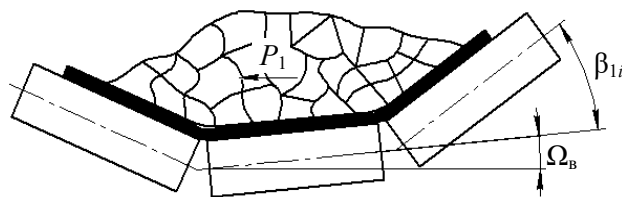


Рисунок 1. – Схема взаимодействия ленты с перекошенной роликостропой в вертикальной плоскости

$$P_1 = \rho F g l'_p \Omega_b \sum k_i \cos \beta_{1i}, \quad (1)$$

где ρ – плотность ленты;

F – площадь поперечного сечения ленты;

g – ускорение свободного падения;

l'_p – расстояние между роликостропами;

ролями;

Ω_b – угол перекоса роликостропы в вертикальной плоскости;

k_i – парциальная часть веса ленты (с грузом), действующая на i -ю пару роликов или i -й ролик, если он единственный;

β_{1i} – угол наклона i -й пары роликов.

При горизонтальном перекосе роликостропы (рисунок 2) на некоторый угол на ленту действует децентрирующее усилие P_2 [4]:

$$P_2 = 0,5 \rho F g l'_p \sum_i k_i \cos \beta_{1i} [f_1(\beta_{2i} + \Omega_r) - f_1(\beta_{2i} - \Omega_r)], \quad (2)$$

где β_{2i} – угол, образованный осью ролика i -й пары и осью роликостропы (рад);

Ω_r – угол перекоса роликостропы в горизонтальной плоскости;

f_1 – коэффициент, зависящий от угла между векторами скоростей движения ленты и вращения ролика.

Отклонение секции става от оси конвейера (рисунок 3) вызывает децентрирующее усилие P_3 [4]:

$$P_3 = \rho F l_c \sum_{i=1}^3 b_i (u_c - \delta)^i, \quad (3)$$

где l_c – длина секции;

b_i – коэффициент интенсивности восстанавливающей силы;

u_c – отклонение секции става от оси конвейера;

δ – поперечное смещение ленты.

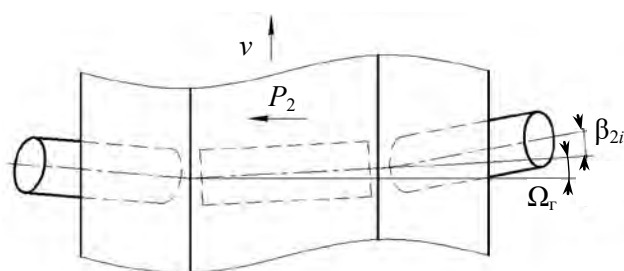


Рисунок 2. – Схема взаимодействия ленты с перекошенной роlikоопорой в горизонтальной плоскости

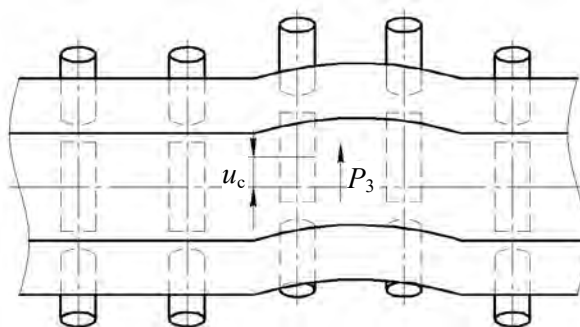


Рисунок 3. – Схема взаимодействия ленты с роlikоопорами при смещении секции става

Различное сопротивление вращению боковых роликов является следствием случайного разброса качества изготовления подшипников и уплотнений роликов. Наиболее неблагоприятным является случай, когда один из боковых роликов вращается с минимальным сопротивлением, а другой – заторможен. Продольная сила трения ленты о невращающийся ролик создает изгибающий момент M_1 (рисунок 4) [4]:

$$M_1 = f_{\text{тр}} \int_0^{l \cos \beta} P(z + 0,5l_p) dz, \quad (4)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения ленты о ролик;

P – сила прижатия ленты к ролику, распределенная по его длине;

l_p – длина ролика;

l – ширина изогнутого края ленты;

z – поперечная координата.

При нецентральной загрузке ленты (рисунок 5), когда грузопоток постоянно смещен на некоторую величину u_r относительно оси конвейера, его так же можно рассматривать как статический децентрирующий фактор. В этом случае на ленту действует распределенная децентрирующая сила P_4 [4]:

$$P_4 = \rho_r F_r g \sum_i Q_i [\sin \beta_{1i} + f_1 (\beta_{2i}) \cos \beta_{2i}], \quad (5)$$

где ρ_r – плотность груза;

Q_i – разность частей площади поперечного сечения груза на ленте, приходящихся на боковые ролик опоры;

F_r – площадь поперечного сечения груза.

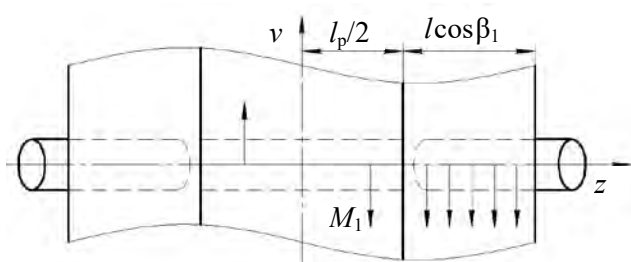


Рисунок 4. – Схема взаимодействия ленты с роликoопорами при заклинивании бокового ролика

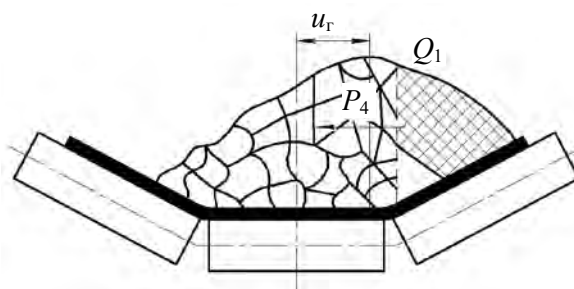


Рисунок 5. – Схема взаимодействия ленты с роликoопорами при нецентральной загрузке ленты

Проанализируем с помощью формул (1)-(5) влияние параметров конвейера на децентрирующие усилия и моменты. Величины децентрирующих усилий P_1 - P_4 и момента M_1 при углах перекоса роликoопор различных конструкций в 2° и заклинивании бокового ролика. На нижней ветви усилие P_1 однороликовых опор и момент двухроликовых условно приняты равными единице; на верхней ветви приняты равными единице усилие P_1 и момент трехроликовых опор.

Исследования перекосов в вертикальной и горизонтальной плоскостях показали, что перекося роликoопор в горизонтальной плоскости в зависимости от состояния контактирующих поверхностей вызывает децентрирующее усилие в 6-8 раз большее, чем такой же перекося в вертикальной плоскости. Так же было выявлено, что при увеличении числа роликoв в опоре и угла наклона боковых роликoв к горизонту децентрирующее усилие P_1 уменьшается. Увеличение отношения числа роликoв, повернутых в плане, к числу роликoв опоры приводит к уменьшению усилия P_2 при углах перекося 0,024-0,053 рад ($1,5$ - 3°), когда проявляется нелинейный характер коэффициента f_1 . При меньших углах перекося поворот боковых роликoв в плане на 0,036-0,045 рад (2 - $2,5^\circ$) не оказывает влияния на усилие P_2 .

В свою очередь момент M_1 , возникающий из-за различия сопротивления вращению боковых роликoв, определяется, в основном, долей веса ленты и груза, приходящейся на заторможенный боковой ролик. При увеличении числа роликoв в опоре момент M_1 уменьшается, так как на каждый ролик приходится меньшая нагрузка. Полученные значения представлены в таблице.

При неодинаковом сопротивлении вращению боковых роликoв боковой сходя ленты происходит под действием сосредоточенного момента M_1 , возникающего в наиболее неблагоприятном случае при заклинивании в роликoопоре бокового ролика. Расчеты показали, что на верхней и нижней ветвях современных конвейеров боковые смещения, вызванные заклиниванием бокового ролика, не превышают 1-2 мм. Неодинаковое сопротивление вращению боковых роликoв является несущественным децентрирующим фактором, поскольку не может вызвать заметных боковых смещений ленты.

Усилия, возникающие в результате отклонения секции става, P_3 и нецентральной загрузки P_4 пропорциональны линейной массе ленты, груза и интенсивности восстанавливающих сил става и практически не зависят от параметров става конвейера, поэтому их значения в таблице не приведены.

Полученные результаты показывают, что при монтаже и эксплуатации ленточных конвейеров необходимо особое внимание обращать на выставление роликoопор в горизонтальной плоскости строго перпендикулярно продольной оси конвейера.

Так же поворот боковых роликoв в плане на угол 0,036-0,054 рад (2 - 3°) увеличивает восстанавливающие силы в 1,6-1,7 раза и не приводит к заметному изнашиванию

ленты и роликов. Подобная конструкция роlikоопор линейной секции может быть рекомендована для конвейеров, эксплуатируемых в условиях, когда точная установка става затруднена.

Таблица. – Сравнительная характеристика децентрирующих усилий P_1, P_2 и момента M_1

Децентрирующий фактор	Роlikоопора нижней ветви			Роlikоопора верхней ветви	
	однороликовая	двухроликовая, $\beta'_0 = 0,18$ рад	трехроликовая, $\beta'_0 = 0,52$ рад	трехроликовая, $\beta'_0 = 0,52$ рад	пятироликовая, $\beta'_{11} = 0,39$ рад, $\beta'_{12} = 0,79$ рад
P_1	1	0,98/0,98	0,91/0,91	1/1	0,92/0,92
P_2	6	5,88/5,15	6/5,54	6/5,80	6/5,58
M_1	-	1/1	0,8/0,8	1/1	0,4/0,4 (0,9/0,9)

Примечания:

1. В числителе приведены значения факторов для $\beta'_2 = 0$, $\beta'_{21} = \beta'_{22} = 0$, в знаменателе для $\beta'_2 = 0,045$ рад, $\beta'_{21} = \beta'_{22} = 0,045$ рад.
2. В скобках приведены значения момента при заклинивании внутреннего наклонного ролика.
3. β'_{11} и β'_{12} – углы наклона внутренних и наружных парных роликов в соответствующей плоскости.
4. β'_0 – угол наклона роликов в соответствующей роlikоопоре.

При использовании пятироликовых желобчатых опор интенсивность восстанавливающих усилий возрастает по сравнению с трехроликовыми в 1,2-1,4 раза вследствие увеличения суммарной длины негоризонтально установленных роликов, а также большего наклона к горизонту крайних роликов.

Однако при увеличении угла наклона боковых роликов к горизонту просыпание груза с ленты вследствие его передоформации начинается при меньших боковых смещениях ленты.

Зависимость допускаемого бокового схода $[\delta]$ от ширины незагруженной кромки ленты, угла и угла естественного откоса груза на ленте имеет следующий вид:

$$[\delta] = \frac{\Delta_{л}}{2} \left\{ 1 + \left[0,5 + 2 \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \beta'_1} \left(0,55 + \frac{0,2}{\cos \beta'_1} \right) \frac{\Delta_{л}}{B} \right]^{1/2} \right\}, \quad (6)$$

где $\Delta_{л}$ – ширина незагруженной кромки ленты;

φ – угол естественного откоса груза на ленте;

β'_1 – угол наклона боковых роликов роlikоопоры;

B – ширина ленты.

Подставляя значения в зависимость 6, получим, что при увеличении угла β'_1 с 0,523 до 0,785 рад (с 30 до 45°) величина $[\delta]$ уменьшается на 10-15 %. Однако увеличение угла наклона боковых роликов β'_1 ограничено допускаемым углом перегиба ленты (ГОСТ 20-85) и условием вписывания ленты в роlikоопору (условием полного прилегания ленты к роликам).

Для определения максимально допустимого смещения ленты на нижней ветви воспользуемся условием некасания лентой металлоконструкций става:

$$[\delta] = \Delta_c / \cos \beta'_1 + l(1 - \cos \beta'_1) / \cos \beta'_1, \quad (7)$$

где Δ_c – зазор между бортом плоской ленты и металлоконструкцией става.

Таким образом, подставляя в выражение (6) и (7) соответствующие значения, получим, что наибольшее смещение ленты на верхней ветви, которая оборудована трехроликowymi опорами, при значениях $\beta'_1 = 0,523$ рад и $\beta'_1 = 0$, а так же на нижней ветви с двухроликowymi опорами при значениях $\beta'_1 = 0,21$ рад и $\beta'_1 = 0$. При этом неточности установки роликоопор в горизонтальной плоскости (перекос Ω_r и отклонение от оси) вызывают наибольшие смещения ленты. Причем на конвейерах с узкой лентой ($B = 0,8$ м) смещения ленты при одинаковых децентрирующих факторах больше, чем на конвейерах с широкой лентой ($B = 1,2$ м), вследствие меньшей жесткости ленты и ее натяжения.

Что касается усилия P_4 , то при нецентральной загрузке или при стационарном смещении грузопотока относительно ленты децентрирующее усилие P_4 уравновешивается восстанавливающими силами линейных опор [5]:

$$P_4 = b_1 \delta, \quad (8)$$

где b_1 – жесткость ленты.

Смещение грузопотока относительно ленты может происходить при боковом сходе ленты в месте загрузки δ_n и отклонении u_r самого грузопотока относительно продольной оси конвейера. Рассматривая эти факторы отдельно, следует отметить, что вследствие смещений ленты в месте загрузки ширина Δ_n ее незагруженной кромки согласно формулам (6) и (8) уменьшается до величины $\Delta_n - \delta_n (1 - \rho_r F_r / \rho F)$ на трехроликowych опорах и до величины $\Delta_n - \delta_n (1 - \rho_r F_r / 2, 2\rho F)$ на пятироликowych.

При отклонении грузопотока от оси конвейера боковой сход ленты определяют по формулам (5) и (6):

$$\delta = \frac{\rho_r F_r g \sum_i Q_i [\sin \beta'_{1i} + f_1(\beta'_{2i}) \cos \beta'_{1i}]}{\rho F \sum_i P_{li}} \approx u_r / \cos \varphi. \quad (9)$$

где φ – угол естественного откоса груза в движении.

Тогда ширина незагруженной кромки ленты согласно формуле (9) уменьшится до значения $\Delta_n - u_r [1,5 - \rho_r F_r / 2\rho F] / \cos \varphi$ на трехроликowych опорах и до $\Delta_n - u_r [1,5 - \rho_r F_r / 4,4\rho F] / \cos \varphi$ на пятироликowych.

Таким образом, отклонение поступающего грузопотока при загрузке уменьшает ширину свободной кромки ленты почти в 1,5 раза больше, чем отклонение ленты в месте загрузки. Параметры поддерживающих роликоопор оказывают незначительное влияние на боковой сход ленты и ширину ее незагруженной кромки. Следовательно, при конструировании загрузочных устройств необходимо, в первую очередь, максимально центрировать грузопоток на ленте в месте загрузки, а затем и ленту при ее движении под загрузочным устройством. Для центрирования лент под загрузочным устройством, расположенным в хвостовой части, целесообразно использовать роликоопоры типа перевернутого желоба, установленные на нижней ветви перед обводным барабаном.

Заключение. Проведенные в работе исследования позволили провести сравнительную характеристику и анализ различных децентрирующих факторов. На основании

полученных данных были предложены способы для повышения самоцентрирующих свойств става конвейера, а так же даны практические рекомендации по снижению боковых перемещений ленты.

Список использованных источников

1. Шахмейстер, Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1978. – 392 с.
2. Ленточные конвейеры горной промышленности: исследования и проектирование: монография / Ю.Н. Захаров [и др.]; под ред. Ю.Н. Захарова; рец. Н.В. Кислов, Ю.Д. Красников. – Гродно: ГГАУ, 2013. – 416 с.
3. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 349 с.
4. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин [и др.]. – М.: Издательство МГГУ, 2005. – 526 с.
5. Ромакин, Н.Е. Конструкция и расчет конвейеров: справочник / Н.Е. Ромакин. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 504 с.

Информация об авторах

Борис Евгений Валерьевич – магистр технических наук, аспирант УО «Барановичский государственный университет», инженер-конструктор, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

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

Information about the authors

Borys Yauheni Valerievich – Master (Engineering), Post-graduate Student, Baranovichi State University, Design engineer, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Troinich Vitali Aleksandrovich – Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, Chief 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 31.07.2020 г.

УДК 66.047.69:622.331

Березовский Н.И., Борисейко В.В.*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ РУКАВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ**

Аннотация. В работе представлена математическая модель, полученная на основании натурных замеров работы газоочистных устройств торфобрикетных заводов, оборудованных рукавными фильтрами, за последние пять лет.

Ключевые слова: аспирационная система, концентрация пыли, давление разрежения, объем очищаемых газов.

Berezovsky N.I., Boriseyko V.V.*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***MATHEMATICAL MODELING OF DUST SEPARATION
PROCESSES BY BAG FILTERS**

Abstract. The paper presents a mathematical model obtained on the basis of field measurements of the operation of gas cleaning devices of peat briquette plants equipped with bag filters over the past five years.

Keywords: aspiration system, dust concentration, vacuum pressure, volume of purified gases.

Введение. Современное технико-экономическое исследование предусматривает подход к изучению технических и экономических явлений. Исследовать всю аспирационную систему целиком от источников пылеобразования до выброса в атмосферу невозможно, целесообразно выполнить декомпозицию (разбиение) на отдельные подсистемы. Нижней гранью декомпозиции объекта на подсистемы служит кибернетическая модель «черного ящика» (рисунок).

Под «черным ящиком» понимается объект (или некоторая его часть – подсистема), для которого можно установить лишь входные, выходные и режимные переменные и отыскать уравнение их взаимосвязи. Иначе, «черный ящик» – это такая система, дальнейшую декомпозицию которой в данной постановке задачи выполнять нецелесообразно, так как внутреннее устройство этой системы неизвестно, но можно исследовать входы X и выходы Y [1].

К таким подсистемам можно отнести источник пылеобразования, местный отсос, сеть воздухопроводов, пылеотделитель. При системном анализе важно определить, к какому классу относится данная система: к детерминированной или стохастической системе. Для детерминированной системы ее развитие (движение) полностью обусловлено и не подвержено случайностям. Большинство авторов, исследовавших процессы осаждения пыли в пылеотделителях, рассматривали их как детерминированные системы, но нет ни одного случая экспериментального подтверждения этих моделей. Между тем, в промышленной вентиляции практически нет вентиляционных процессов, не подверженных влиянию случайных факторов. Во всех перечисленных подсистемах аспирационных и вентиляционных систем огром-

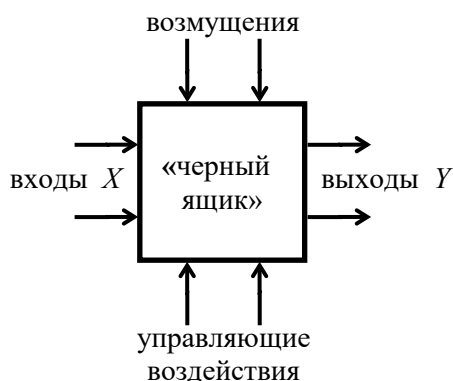


Рисунок. – Схематическое изображение «черного ящика»

К таким подсистемам можно отнести источник пылеобразования, местный отсос, сеть воздухопроводов, пылеотделитель. При системном анализе важно определить, к какому классу относится данная система: к детерминированной или стохастической системе. Для детерминированной системы ее развитие (движение) полностью обусловлено и не подвержено случайностям. Большинство авторов, исследовавших процессы осаждения пыли в пылеотделителях, рассматривали их как детерминированные системы, но нет ни одного случая экспериментального подтверждения этих моделей. Между тем, в промышленной вентиляции практически нет вентиляционных процессов, не подверженных влиянию случайных факторов. Во всех перечисленных подсистемах аспирационных и вентиляционных систем огром-

ное влияние оказывают случайные факторы, основным из которых является турбулентность воздушных малоскоростных потоков. Обусловлено это самой природой турбулентных течений. По этой причине детерминированные модели вентиляционных процессов, как правило, не подтверждаются экспериментами [1].

Построение физико-математической модели аспирационной системы. В вероятностных (стохастических) системах наряду с необходимостью действует случайность. В них изменение фактора X_i на величину ΔX_i вызывает изменение выхода Y_j на величину $\Delta Y_j + \delta\{Y_j\}$, где $\delta\{Y_j\}$ – случайная величина. Поскольку в стохастической системе помимо детерминированных факторов X_i действуют случайные факторы ξ_i , выход Y_j также будет случайной величиной (величина Y_j может складываться из детерминированной и случайной компонент, как, например, мгновенная скорость воздушного турбулентного потока) [1].

Вероятностные свойства многих систем, в том числе аспирационных устройств, обладают эргодичностью [1]. Для эргодических систем математическое ожидание по временным рядам должно совпадать с математическим ожиданием по пространственным рядам (система, в которой фазовые средние совпадают с временными). То есть, для расчета и определения параметров системы можно долго наблюдать за поведением одного ее элемента, а можно за очень короткое время рассмотреть все ее элементы (или достаточно много элементов). В обоих случаях получатся одинаковые результаты, если система обладает свойством эргодичности – это специальное свойство некоторых динамических систем, состоящее в том, что в процессе эволюции почти каждое состояние с определенной вероятностью проходит вблизи любого другого состояния системы. Преимущество эргодических динамических систем в том, что при достаточном времени наблюдения такие системы можно описывать статическими методами [1, 2].

Вероятностные свойства проявляются не только в ансамбле реализаций, но и во времени и (или) в пространстве. Так, например, наблюдая за поведением одной пылевой частицы во времени или изучая как эти свойства меняются при переходе от одной точки пространства к другой. Свойство эргодичности важно для выполнения, например, статического моделирования [1].

Если входные параметры и параметры системы являются случайными, то возникает вопрос о связи между соответствующими вероятностными мерами или некоторыми характеристиками этих параметров. Установление этой связи при заданной связи между реализациями является предметом статической динамики. Иначе говоря, статическая динамика изучает поведение систем при случайных воздействиях и (или) при случайном изменении свойств системы.

Первая основная задача статической динамики заключается в определении вероятностных свойств стохастической системы по известным характеристикам на ее входе и выходе. Изучение свойств неизвестной системы путем сопоставления ее реакций с входными воздействиями составляет проблему «черного ящика». Такой задачей, например, является определение фракционных эффективностей пылеотделителя по известным дисперсным составам нескольких видов пыли на входе и соответствующим эффективностям осаждения этих видов пыли [1].

Вторая задача состоит в нахождении вероятностных свойств выходных параметров при известных вероятностных свойствах входных параметров и параметров системы. Это может быть определение дисперсности пыли на выходе из аппарата, что необходимо при расчете эффективности многоступенчатых аппаратов.

Третья задача состоит в нахождении вероятностных свойств входных параметров по известным свойствам выходных параметров. Свойства системы предполагаются известными. Сюда относятся задачи определения дисперсности пыли в воздушных потоках с помощью соответствующих приборов, основанных на принципе воздушной классификации [1].

Следовательно, математические модели могут быть разделены на детерминированные и статистические (стохастические). Под детерминированной понимают модель, в которой каждая переменная (параметр) может принимать определенное фиксированное значение или ряд фиксированных значений в любых заданных условиях. В статистических моделях допускается неопределенность. В них переменные (или параметры), используемые для описания связи между входом и выходом, а также структура элементов точно не известны. Статические модели имеют перед аналитическими моделями то преимущество, что они не требуют грубых упрощений и позволяют учесть большее число факторов [1].

Однако наилучшие результаты получаются при совместном использовании аналитических и статистических моделей: простая аналитическая модель позволяет разобраться в основных контурах явления и наметить пути дальнейших исследований, в которых могут быть применены статические модели любой сложности.

Таким образом, при построении физико-математической модели целесообразно исходить из того, что процессы сепарации пыли, протекающие во всех элементах аспирационных систем, в том числе в пылеосадителях, являются в значительной мере стохастическими, поэтому необходимо рассматривать не только детерминированную, но и, главным образом, более свободную и многозначную вероятностную картину связи между факторами. Значения коэффициентов и отдельные функциональные зависимости должны быть определены экспериментальным путем на физических моделях [1].

Проведенные натурные испытания и расчеты показывают, что чем выше концентрация пыли на входе в газоочистное устройство (ГОУ), тем выше степень очистки. Однако этот показатель удельный, потому он не всегда обеспечивает допустимый предел по выбросам в атмосферу. При создании конструкций ГОУ с рукавными фильтрами в основе математической зависимости требуется назначать выходным контролируемым параметром количество выбросов после очистки воздуха. Этот параметр больше всего зависит от соотношения воздух/ткань, количества выбросов, образуемых источником пылеобразования и от скорости пылевоздушной смеси.

В общем случае для стандартизированных данных функциональную зависимость показателя от параметров можно представить в виде:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) + e, \quad (1)$$

где f – заранее неизвестная функция, подлежащая определению;

e – ошибка аппроксимации данных (приближение).

Указанное уравнение принято называть выборочным уравнением регрессии. Это уравнение характеризует зависимость между вариацией показателя и вариациями факторов. А мера корреляции измеряет долю вариации показателя, которая связана с вариацией факторов. Иначе говоря, корреляцию показателя и факторов нельзя трактовать как связь их уровней, а регрессионный анализ не объясняет роли факторов в создании показателя. Еще одна особенность касается оценки степени влияния каждого фактора на показатель. Регрессионное уравнение не обеспечивает оценку отдельного влияния каждого фактора на показатель, такая оценка возможна лишь в случае, когда все другие факторы не связаны с изучаемым. Если изучаемый фактор связан с другими, влияющими на показатель, то будет получена смешанная характеристика влияния фактора. Эта характеристика содержит как непосредственное влияние фактора, так и опосредованное влияние, оказанное через связь с другими факторами и их влиянием на показатель [3]. Пользуясь методами корреляционно-регрессионного анализа, аналитики измеряют тесноту связей показателей с помощью коэффициента корреляции. При этом обнаруживаются связи, различные по силе (сильные, слабые, умеренные и др.) и различные по направлению (прямые, обратные). Если связи окажутся существенными, то целесообразно будет найти их математическое выражение в виде регрессионной модели и оценить статистическую значимость модели.

В регрессионное уравнение не рекомендуется включать факторы, слабо связанные с показателем, но тесно связанные с другими факторами. Не включают в уравнение и факторы, функционально связанные друг с другом (для них коэффициент корреляции равен 1). Включение таких факторов приводит к вырождению системы уравнений для оценок коэффициентов регрессии и к неопределенности решения. Функция f должна подбираться так, чтобы ошибка e в некотором смысле была минимальна. В целях выбора функциональной связи заранее выдвигают гипотезу о том, к какому классу может принадлежать функция f , а затем подбирают «лучшую» функцию в этом классе. Выбранный класс функций должен обладать некоторой «гладкостью», т.е. «небольшие» изменения значений аргументов должны вызывать «небольшие» изменения значений функции.

Систему уравнений на основе имеющихся данных однозначно решить невозможно, так как количество неизвестных всегда больше количества уравнений. Для преодоления этой проблемы нужны дополнительные допущения. Здравый смысл подсказывает: желательно выбрать коэффициенты полинома так, чтобы обеспечить минимум ошибки аппроксимации данных. Могут применяться различные меры для оценки ошибок аппроксимации. В качестве такой меры нашла широкое применение среднеквадратическая ошибка. На ее основе разработан специальный метод оценки коэффициентов уравнений регрессии – метод наименьших квадратов. Этот метод позволяет получить оценки максимального правдоподобия неизвестных коэффициентов уравнения регрессии при нормальном распределении вариант, но его можно применять и при любом другом распределении факторов [3]. Поэтому рассмотрим зависимость выходного параметра Y от независимых переменных X_1, X_2, X_3 . Модель линейной регрессии имеет следующий вид:

$$Y = A_0 + A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + A_3 \cdot X_3, \quad (2)$$

где A – коэффициенты регрессии;

X – влияющие переменные.

На основании экспериментальных данных (таблица) получим математическую модель процесса пылеулавливания рукавного фильтра (обработано с помощью MS Excel, анализ данных, статистическая регрессия):

$$Y = 45,2 + 4,4 G + 3,45 Q - 24,27 P, \quad (3)$$

где Y – концентрация пыли на выходе из ГОУ, мг/м³;

G – концентрация пыли на входе в ГОУ, г/м³;

Q – объем очищаемых газов, м³/с;

P – давление разрежения, кПа.

Коэффициент 45,2 (Y -пересечение) показывает, каким будет Y , если все переменные в рассматриваемой модели будут равны нулю. Это означает, что на значение анализируемого параметра влияют и другие факторы, не описанные в модели. Коэффициент 4,4 показывает весомость переменной X_1 на Y , (степень влияния запыленности воздушного потока G на входе в ГОУ). Коэффициент 3,45 показывает весомость переменной X_2 на Y , (степень влияния объема очищаемого воздушного потока Q). Коэффициент 24,27 показывает наибольшую весомость переменной X_3 на Y , что указывает на значительное снижение запыленности Y на выходе из ГОУ с увеличением давления разрежения P (знак минус указывает на обратную связь).

Рассмотренный подход не обеспечивает независимой оценки коэффициентов – изменение значения одного коэффициента влечет изменение значений других. Данное уравнение регрессии является лишь хорошим аналитическим описанием имеющихся экспериментальных данных, а не законом, описывающим взаимосвязи влияющих входных параметров и выходного показателя.

Таблица. – Результаты замеров работы ГОУ торфобрикетных заводов, оборудованных рукавными фильтрами SimPact (2015-2019 г.г.)

Показатели				Примечание
$Y, \text{ мг/м}^3$ ($Y_{\text{max}} = 100$)	$G, \text{ г/м}^3$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$P, \text{ кПа}$	
20,1	3,505	2,02	1,929	данные по аспирационной системе штемпелей прессов
33,6	3,728	3,25	1,642	
17,3	0,458	2,7	1,573	
17,5	0,748	2,75	1,632	
17,2	0,32	2,8	1,690	
19,4	0,675	1,71	1,551	данные по аспирационной системе зевов прессов
17,7	0,553	2,2	1,540	
15,4	0,397	1,99	1,520	
15,4	0,555	2,02	1,567	

Это уравнение можно применить для расчета значений показателя в заданном диапазоне изменения влияющих параметров. Оно ограничено пригодно для расчета вне этого диапазона, т.е. его можно применять для решения задач интерполяции (преобразования) и в ограниченной степени для экстраполяции (распространения выводов и научное прогнозирование событий).

Заключение. Таким образом, на основании экспериментальных данных получена математическая модель процесса пылеулавливания рукавных фильтров (выходного параметра – допустимых выбросов в атмосферу; влияющих переменных – концентрации пыли на входе в рукавный фильтр, производительности по пылегазовому потоку, давления разрежения). Коэффициент детерминации уравнения регрессии составил $R^2 = 0,92$ (уравнение (3)).

Список использованных источников

1. Самсонов, В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности: методы и средства / В.Т. Самсонов. – М.: Инфра-М, 2016. – 232 с.
2. Шиялев, М.И. Методы расчета пылеуловителей / М.И. Шиялев, А.М. Шиялев. – М.: Издательство Форум, 2017. – 320 с.
3. Богатов, Б.А. Математические методы в торфяном производстве / Б.А. Богатов, В.Д. Копенкин. – М.: Недра, 1991. – 240 с.

Информация об авторах

Березовский Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: berezovsky@bntu.by.

Борисейко Владимир Васильевич – аспирант, старший преподаватель кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: boriseyko.v@bntu.by.

Information about the authors

Berezovsky Nikolay Ivanovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the “Mining machinery” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: berezovsky@bntu.by.

Boriseyko Vladimir Vasilievich – Post-graduate Student, Senior lecturer, “Mining machinery” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: boriseyko.v@bntu.by.

Поступила в редакцию 25.06.2020 г.

УДК 62-47:533.2(045)

Левданский И.А., Волк А.М.*УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ПЕРФОРИРОВАННОМ ЭЛЕМЕНТЕ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИХРЕВОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА**

Аннотация. Предлагаемый способ удаления влаги с поверхности частиц крупнозернистого материала заключается в придании частицам вращательного движения с высокой угловой скоростью в вертикальном перфорированном элементе нисходящим вихревым потоком. За счет центробежной силы, возникающей при вращении частиц, будет происходить срыв влаги с поверхности, которая будет уноситься из зоны разделения воздушным потоком. Разработана методика расчета аппарата для газоцентричного обезвоживания влажных материалов.

Ключевые слова: обезвоживание, крупные полидисперсные частицы, вихревой поток, перфорированный элемент, скорость газового потока.

Levdansky I.A., Volk A.M.*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***MOVEMENT OF SOLID PARTICLES IN A PERFORATED ELEMENT
UNDER THE INFLUENCE OF A VORTEX GAS FLOW**

Abstract. The proposed method for removing moisture from the surface of coarse-grained material particles is to give the particles a rotational motion with a high angular velocity in a vertical perforated element with a downward eddy current. Due to the centrifugal force created by the rotation of the particles, moisture is destroyed from the surface and transported by air flows from the separation zone. A method for calculating a device for gas-centric dewatering of wet materials has been developed.

Keywords: dewatering, large polydisperse particles, vortex flow, perforated element, gas flow rate.

Введение. Процесс сушки, заключающийся в удалении влаги из твердых и пастообразных материалов путем ее испарения, широко распространен в различных отраслях промышленности, например, в химической, пищевой. Зачастую процесс сушки является заключительной стадией технологического процесса. Ввиду того, что испарение влаги достаточно энергоемкий процесс, то предварительно влагу стараются удалить более дешевыми способами, например, в центрифугах, фильтрах, а затем удалить оставшуюся влагу сушкой. При этом тепло затрачивается не только на испарение влаги, но и на нагрев материала и потери в окружающую среду, что делает стоимость сушки достаточно высокой.

Основная часть. Известны работы [1-3], где рассматриваются вопросы удаления влаги с поверхности материала не сушкой, а путем обдува частиц скоростным воздушным потоком, что позволяет значительно снизить расход энергии на процесс обезвоживания. Нами разработан новый более эффективный способ, при котором удаление влаги с поверхности частиц осуществляется в вертикальном перфорированном элементе нисходящим вихревым газовым потоком [4]. При использовании предлагаемого способа удаление влаги с поверхности частиц будет осуществляться за счет многих факторов. Рассмотрим эти факторы по мере их осуществления при движении частиц в перфорированных элементах. При подаче влажного материала в центр элемента частицы за счет воздействия вихревого газового потока будут с большим ускорением двигаться к

стенке элемента. Так как газовый поток в элементе имеет высокий градиент скорости, то воздействие его на частицы приведет к вращению их вокруг своей оси. Угловая скорость вращения может достигать больших значений, измеряемых тысячами оборотов в минуту [5]. За счет центробежной силы, возникающей при вращении частиц, будет происходить срыв влаги с поверхности. Так как в большинстве случаев частицы материала являются полидисперсными, то они в газовом потоке будут двигаться с различной скоростью, что приведет к массовому их соударению. Естественно, при соударении частиц за счет резкого торможения влага будет срываться с поверхности частиц. Далее частицы, двигаясь в радиальном направлении, приобретают высокую скорость и ударяются о перфорированную стенку элемента. Естественно, и здесь при ударе будет наблюдаться срыв влаги с поверхности частиц.

В ряде работ [5-7] как теоретически, так и экспериментально показано, что частица, достигнув стенки элемента, будет двигаться вниз, скатываясь по перфорированной поверхности, или будет наблюдаться скачкообразное движение. Многие исследователи отмечают, что скачкообразное движение наблюдается при достижении высоких скоростей газового потока. При скачкообразном движении частиц за счет многократных ударов, обтирания об стенку и обдува высокоскоростным газовым потоком также будет происходить удаление влаги с поверхности частиц.

Таким образом, в предлагаемом способе практически по всей траектории движения частицы будет происходить удаление поверхностной влаги.

Чтобы определить эффективность удаления влаги с поверхности частиц при осуществлении данного способа были проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования. Для определения скорости частиц, движущихся в перфорированном элементе под воздействием вихревого газового потока, запишем в цилиндрической системе координат уравнения их движения [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_a \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r - F_{\Pi}; \\ m_a \left(\frac{dV_\varphi}{dt} + 2 \frac{V_\varphi V_r}{r} \right) = F_\varphi - F_{\text{ТР}}^\varphi; \\ m_a \frac{dV_z}{dt} = m_a g + F_z + F_{\text{ТР}}^z - F_A; \\ I_a \frac{d\omega_\varphi}{dt} = M_{\text{ТР}}^\varphi + M_\tau^\varphi; \\ I_a \frac{d\omega_z}{dt} = M_{\text{ТР}}^z + M_\tau^z, \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_a – масса частицы, кг;

V – скорость движения частицы, м/с;

V_φ, V_r, V_z – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие скорости частицы, м/с;

t – время, с;

F_r, F_φ, F_z – составляющие силы гидродинамического воздействия, Н;

F_{Π} – подъемная сила, Н;

$F_{\text{ТР}}$ – сила трения, Н;

F_A – сила Архимеда, Н;

g – ускорение свободного падения; м/с²;

I_a – момент инерции частицы, кг·м²;

ω – угловая скорость, c^{-1} ;

M – момент количества движения (момент импульса), $m^2 \cdot \text{кг}/\text{с}$;

$M_{\text{ТР}}$ – момент силы трения, $\text{Н}/\text{м}$;

M_τ – вращающий момент на поверхности частицы, $\text{Н}/\text{м}$.

Схема действующих сил представлена на рисунках 1, 2. Рассматриваем случай контакта частицы с проницаемой поверхностью.

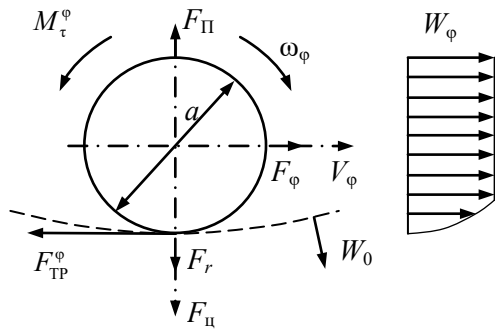


Рисунок 1. – Касательные составляющие действующих на частицу сил

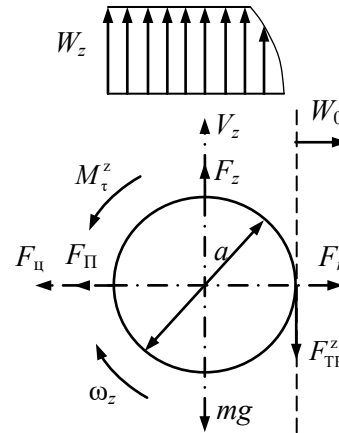


Рисунок 2. – Нормальные составляющие действующих на частицу сил

При расчетах принимаем, что частица имеет сферическую форму диаметром a , плотностью ρ_a и массой m_a . Центробежную силу обозначим как $F_{\text{ц}}$ [Н], а скорость прохождения двухфазного потока через отверстия перфорации W_0 [м/с].

Методика расчета величины сил, входящих в систему уравнений (1), подробно изложена в литературе [8, 9], и при решении данной системы уравнений воспользуемся этими зависимостями. Однако, для расчета некоторых сил – подъемной силы, состоящей из сил Магнуса и Архимеда, сил гидродинамического воздействия и других – необходимо иметь математические зависимости для расчета профилей осевой W_z и касательной W_ϕ составляющих скорости закрученного газового потока в проницаемом цилиндре, а также для определения давления, создаваемого закрученным газовым потоком, действующим на стенку перфорированного цилиндра.

Профили осевой и касательной скоростей вихревого газового потока определялись на основании экспериментальных исследований, которые были проведены нами на опытной установке по методике, изложенной в работе [10]. Одновременно на этой установке проводился замер давления на стенку, создаваемого закрученным газовым потоком. Результаты экспериментальных исследований были обработаны и представлены в виде математических зависимостей. Но прежде чем рассматривать результаты экспериментальных исследований, рассмотрим уравнения Навье-Стокса и неразрывности в цилиндрической системе координат [11]. Для осесимметричных потоков принимаем $\frac{dW}{d\phi} = 0$. При движении закрученных газовых потоков даже с частичным оттоком

газа через отверстия перфорации радиальная составляющая газового потока W_r незначительна и поэтому в расчетах не учитывается. Также в случае с газовым потоком не учитываем силу тяжести. Тогда из уравнения неразрывности следует $\frac{dW}{dz} = 0$. Следовательно, профиль осевой скорости не изменяется по длине.

Проведенные исследования показали, что профили тангенциальной и осевой скоростей газа изменяются по радиусу элемента по сложной кривой, имеющей характерный максимум. За тангенциальной улиткой в центре элемента возникает зона обратных токов. Исследуемые профили скоростей сохраняют подобие для элементов 50-200 мм, при скоростях газа 10-40 м/с. По длине элемента профили скорости изменяются незначительно. Например, на расстоянии от улитки, равном $8R$, максимальное значение тангенциальной скорости уменьшилось на 8 %.

Обработка опытных данных по значению тангенциальной и осевой скоростей газового потока проводилась в безразмерном виде:

$$\overline{W}_\varphi = \frac{W_\varphi}{W_{\text{cp}}}; \quad (2)$$

$$\overline{W}_z = \frac{W_z}{W_{\text{cp}}}, \quad (3)$$

где W_{cp} – средняя расходная скорость газового потока в элементе, радиус которого так же приводился к безразмерному виду:

$$\overline{r} = \frac{r}{R}, \quad (4)$$

где r – текущий радиус;

R – радиус элемента.

Аппроксимация опытных данных на ЭВМ позволила получить уравнения для тангенциальной и осевой скоростей в виде полиномов третьей степени:

$$\overline{W}_\varphi = \frac{W_\varphi}{W_{\text{cp}}} = -4,0162 \left(\frac{r}{R} \right)^3 - 2,3641 \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 6,3847 \frac{r}{R} + 0,086; \quad (5)$$

$$\overline{W}_z = \frac{W_z}{W_{\text{cp}}} = -10,671 \left(\frac{r}{R} \right)^3 + 11,819 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 1,1347 \frac{r}{R} + 0,0383. \quad (6)$$

Замеры давления воздуха на стенку внутри фильтровального элемента производились в четырех точках перфорированного патрубка с помощью дифференциальных манометров. Для присоединения дифференциальных манометров к фильтровальному элементу по его высоте с шагом в 100 мм были предусмотрены технологические отверстия диаметром 3 мм с ниппелями, при помощи которых резиновые шланги соединяли дифференциальные манометры с установкой.

Обработка опытных данных показала, что основное влияние на величину давления газового потока на стенку оказывает среднерасходная скорость газового потока. Снижение давления по длине элемента незначительно, так как не превышает семи процентов. В результате обработки опытных данных получена следующая зависимость для расчета давления вихревого потока ΔP на стенку элемента:

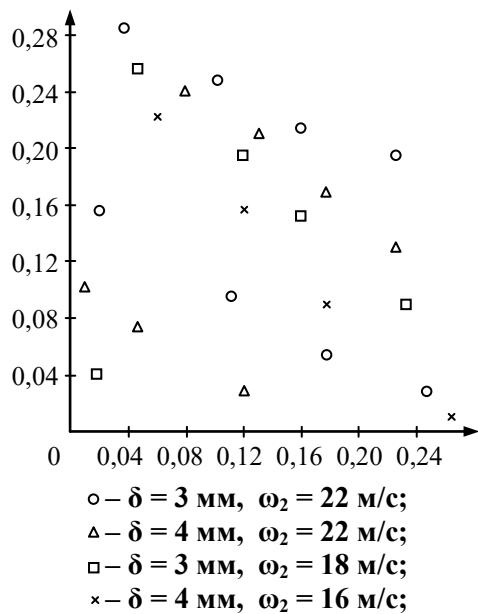
$$\Delta P = \xi \rho_\Gamma W^2 = 2,2 \rho_\Gamma W^2, \quad (7)$$

где ξ – коэффициент гидродинамического сопротивления;

ρ_Γ – плотность газа, кг/м³;

W – скорость газового потока, м/с.

Кроме исследования профиля скоростей газового потока, а также его давления на стенку на опытной установке проводились исследования по определению условий, при которых частицы в перфорированном элементе будут двигаться вдоль стенки скачками. Для этого в вертикальный фильтровальный элемент через тангенциальную улит-



δ – диаметр следа; ω_2 – скорость воздуха
Рисунок 3. – Развертка фильтровального элемента со следами частиц

ку сверху подавался газовый поток, а по центру также сверху подавались одиночные шарообразные частицы, диаметром 3-4 мм, изготовленные из восковых цветных мелков. Средняя скорость газа изменялась от 10 до 30 м/с. После каждого опыта установка частично разбиралась, а фильтровальный элемент разворачивался, и по оставшимся на стенке следам определялась траектория частиц.

На рисунке 3 представлена развертка фильтровального элемента, со следами частиц. Во всех опытах на внутренней поверхности элемента обнаруживали следы частиц в виде отдельных точек с расстоянием между ними 50-90 мм. Таким образом, экспериментальные исследования показывают, что в фильтровальном элементе частицы могут двигаться скачками, однако, для этого нужно создать необходимые условия, а именно, необходимо поддерживать высокую скорость газового потока, высокую начальную скорость частиц $\vartheta_{нач}$ и т.д. По наличию следов частиц на фильтровальной поверхности элемента определялась критическая скорость газа $\omega_{кр}$ в элементе, когда частицы газа начнут двигаться по пористой поверхности скачками. На рисунке 4 приведен график, где показано как изменяется критическая скорость газа в зависимости от диаметра частиц a . Из графика видно, что для частиц диаметром 1 мм критическая скорость равна 12 м/с, а для частиц диаметром 4 мм она увеличивается до 18 м/с. Начальная скорость частиц также влияет на критическую скорость газа, и чем она выше, тем выше и критическая скорость, что хорошо видно из графика на рисунке 5.

Для этого нужно создать необходимые условия, а именно, необходимо поддерживать высокую скорость газового потока, высокую начальную скорость частиц $\vartheta_{нач}$ и т.д. По наличию следов частиц на фильтровальной поверхности элемента определялась критическая скорость газа $\omega_{кр}$ в элементе, когда частицы газа начнут двигаться по пористой поверхности скачками. На рисунке 4 приведен график, где показано как изменяется критическая скорость газа в зависимости от диаметра частиц a . Из графика видно, что для частиц диаметром 1 мм критическая скорость равна 12 м/с, а для частиц диаметром 4 мм она увеличивается до 18 м/с. Начальная скорость частиц также влияет на критическую скорость газа, и чем она выше, тем выше и критическая скорость, что хорошо видно из графика на рисунке 5.

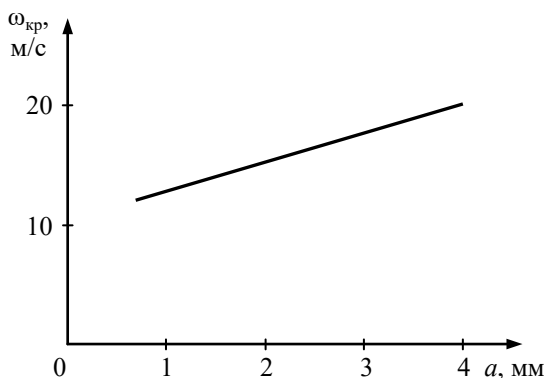


Рисунок 4. – Влияние диаметра частиц на критическую скорость газа при $\vartheta_{нач} = 2$ м/с

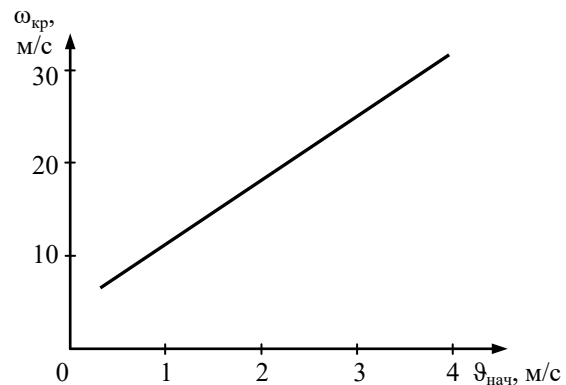


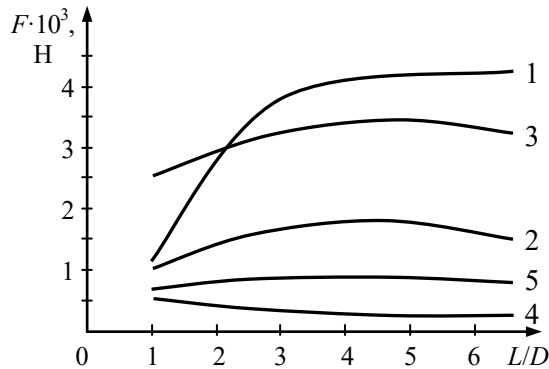
Рисунок 5. – Влияние начальной скорости частиц на критическую скорость газа при $a = 2$ мм

Предложенная система дифференциальных уравнений (1), описывающая движение сферической частицы в перфорированном элементе, и анализ действующих на нее сил позволяют рассчитать ее траекторию в вихревых потоках [8]. Составленная система уравнений не имеет аналитического решения, но ее численное интегрирование с помощью стандартных программ не вызывает особых затруднений.

Прежде всего, нами рассчитывались силы, действующие на частицу, и их изменения по длине элемента. Результаты этих расчетов представлены на рисунке 6.

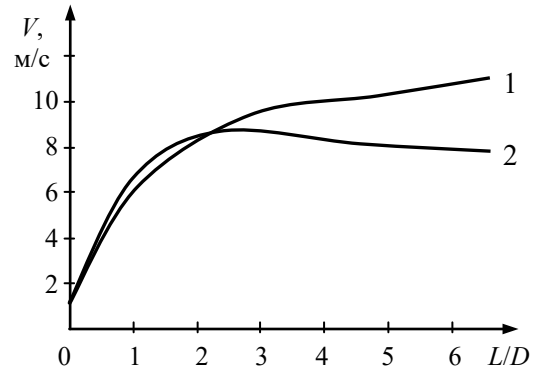
Из графиков видно, что центробежная и подъемные силы являются преобладающими. Поэтому одиночная частица движется по винтовой траектории и периодически контактирует с проницаемой поверхностью стенки элемента.

Далее определялись осевая и касательные составляющие скорости частиц по длине элемента, и эти результаты представлены на рисунке 7.



1 – подъемная сила; 2 – сила трения;
3 – центробежная сила; 4, 5 – осевая и касательная составляющие силы гидродинамического воздействия

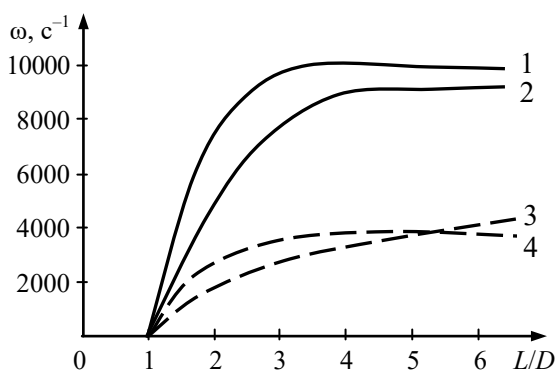
Рисунок 6. – Изменение по длине перфорированного элемента сил воздействия F на частицу диаметром $a = 2$ мм ($\bar{W}_z = 20$ м/с; $D = 0,1$ м; $\alpha = 35^\circ$; $\bar{f}_z = 0,16$)



1 – осевая составляющая скорости частицы; 2 – касательная составляющая скорости частицы

Рисунок 7. – Изменение осевой и касательной составляющих скоростей частицы по длине элемента ($\bar{W}_z = 20$ м/с; $\rho_a = 950$ кг/м³; $D = 0,1$ м; $\bar{f}_z = 0,16$)

На рисунках 6, 7: L – длина фильтровального элемента, м; D – диаметр фильтровального элемента, м; α – параметр крутки газового потока (угол наклона лопаток завихрителя); \bar{f}_z – относительная площадь отверстий проницаемой поверхности.



1, 3 – касательные составляющие (расчетные); 2, 4 – осевые составляющие ($\omega = V/a$); 1, 2 – диаметр частиц полистирола $a = 2$ мм; 3, 4 – $a = 4$ мм

Рисунок 8. – Изменение угловой скорости вращения частиц полистирола по длине перфорированного элемента ($\rho_a = 1150$ кг/м³; $\bar{W}_z = 20$ м/с; $D = 0,1$ м)

Из графиков видно, что осевая составляющая W_z практически остается постоянной по длине, а касательная начинает падать, то есть крутка снижается.

Очень важным фактором для расчета процесса удаления поверхностной влаги с частиц является скорость вращения самих частиц относительно собственной оси. Поэтому определение изменений угловой скорости вращения частиц по длине элемента является следующей задачей. Результаты решения этой задачи представлены на графике рисунка 8.

Из графиков видно, что на расстоянии $L/D = 3$ скорость вращения частиц достигает своего максимума и далее остается постоянной.

Толщина слоя жидкости, находящейся на поверхности вращающейся час-

тицы, уравнивается, с одной стороны, поверхностным натяжением, а, с другой стороны, центробежной силой, на основании этого можно записать следующее уравнение:

$$\frac{\sigma}{a} = \frac{\rho_a \delta_a \omega_a^2}{\sin \theta}, \quad (8)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

ω_a – угловая скорость частицы, с^{-1} ;

θ – угловая координата цилиндрической системы координат, град.

Из уравнения (8) можно получить формулу для расчета толщины пленки жидкости δ_a , оставшейся на частице:

$$\delta_a = \frac{\sigma \sin \theta}{\rho_a \omega_a^2 a^2}. \quad (9)$$

Если проинтегрировать уравнение (9) можно определить массу жидкости, находящейся на поверхности частицы:

$$m_\delta = \int_0^\pi 2\pi \sin \theta \rho_a \delta_a a d\theta = \int_0^\pi \frac{2\pi\sigma}{\omega_a^2} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi^2 \sigma}{\omega_a^2}. \quad (10)$$

Тогда влажность частицы составит:

$$\psi = \frac{m_\delta}{m_a} 100 \% = \frac{3}{4} \frac{\pi \sigma}{\rho_a V_a^2} 100 \%. \quad (11)$$

Последняя формула показывает, что влажность после аппарата не зависит от плотности жидкой фазы, а в значительной степени определяется гидродинамическими характеристиками движения частицы в аппарате.

Заключение. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета аппарата для газочентробежного обезвоживания влажных материалов. С помощью данного аппарата можно значительно снизить энергетические затраты на сушку крупнозернистых материалов или вообще отказаться от процесса сушки.

Список использованных источников

1. Кваша, В.Б. Срыв влаги с поверхности частиц в инжекторном слое / В.Б. Кваша, В.В. Чижов, В.Г. Айнштейн // Инженерно-технический журнал. – 1976. – № 3. – С. 411-415.
2. Сорока, Е.И. Разработка комбинированного способа сушки, основанного на дезагрегации дисперсных материалов и механическом уносе влаги с целью экономии топлива: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / Е.И. Сорока; ВНИИ металлург. теплотех. – Свердловск, 1990. – 25 с.
3. Филипов, В.А. Технология сушки и термоаэроклассификации углей / В.А. Филипов. – М.: Недра, 1980. – 287 с.
4. Способ удаления влаги с поверхности частиц крупнозернистого материала: пат. 20508 Респ. Беларусь, МПК В01D12/00 / Э.И. Левданский, И.А. Левданский; заявитель УО «Белорусский государственный технологический университет». – № а20130201; заявл. 15.02.13; опубл. 30.10.16 // Афіцыйны бюл. / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 5. – С. 78.

5. Бабуха, Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г.Л. Бабуха, А.А. Шрайбер. – Киев: Наукова думка, 1972. – 175 с.
6. Соловьев, М.И. К вопросу взвешивания и транспортирования зернистого материала в горизонтальном трубопроводе / М.И. Соловьев // Инженерно-физический журнал. – 1964. – № 10. – С. 62-66.
7. Грачев, Ю.Г. Исследование процесса отрыва твердых частиц от поверхности под воздействием потока воздуха / Ю.Г. Грачев, В.К. Хеннер, А.И. Гришков // Вопросы совершенствования строительства. – 1973. – № 124. – С. 151-156.
8. Волк, А.М. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке / А.М. Волк, Е.В. Терешко // Труды БГТУ. – 2015. – № 6 (179). – С. 10-14.
9. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 частях / Р.И. Нигматулин. – М: Наука, Гл. редакция физ.-мат. лит., 1987. – Ч. 1. – 464 с.
10. Ершов, А.И. Разработка, исследование и применение элементных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученном прямотоке: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / А.И. Ершов. – Ленинград, 1975. – 304 л.
11. Гольдштик, М.А. Вихревые потоки: монография / М.А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 365 с.

Информация об авторах

Левданский Иван Александрович – магистр технических наук, аспирант УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: piahp@belstu.by.

Волк Анатолий Матвеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшей математики», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: volk@belstu.by.

Information about the authors

Levdansky Ivan Alexandrovich – Master (Engineering), Post-graduate Student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: piahp@belstu.by.

Volk Anatoly Matveyevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor of the Department of “Higher mathematics”, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: volk@belstu.by.

Поступила в редакцию 04.05.2020 г.

УДК 625.1.098:534.836.2.08(045)

Масловская М.А., Довгелюк Н.В., Шагулин В.С.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***СНИЖЕНИЕ ШУМА, ВОЗНИКАЮЩЕГО ПРИ ДВИЖЕНИИ
ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ**

Аннотация. В статье исследовано влияние конструкции пути и нагрузки, приходящейся на ось колесной пары, на основное удельное сопротивление движению грузовых вагонов, от которого зависит масса состава поездов, обращающихся на железной дороге. Установлено, что снижение основного удельного сопротивления движению грузовых поездов равнозначно снижению уровня шума от контакта «колесо-рельс», воспринимаемого человеческим ухом.

Ключевые слова: поезд, ось, колесная пара, сопротивление, шум, железная дорога, оценка, вагон, скорость, конструкция.

Maslovskaya M.A., Dovgelyuk N.V., Shagulin V.S.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***WAYS TO REDUCE THE NOISE OF FREIGHT TRAINS**

Abstract. The article investigates the influence of the mass attributable to the axis of the wheelset, the track structure on the main specific resistance to the movement of freight cars, which determines the mass of trains operating on the railway. The influence of the speed of movement and the type of car on the main specific resistance to movement, as well as the absolute and relative change in resistance to movement of cars from speed, are estimated.

Keywords: train, axle, wheelset, resistance, noise, railroad, estimation, wagon, speed, design.

Введение. В программе развития транспорта в Республике Беларусь на 2016-2020 годы подчеркивается, что одним из путей повышения пропускной и провозной способности железной дороги является увеличение массы и длины состава грузового поезда [1]. Увеличение массы состава грузового поезда влечет за собой повышение пропускной и провозной способности железной дороги. А правильное начертание железнодорожной сети позволяет выполнить это при минимальных затратах, что подчеркнуто в научных трудах ученых [2-6].

При движении на поезд действуют внешние и внутренние силы. Внутренние силы не оказывают влияния на условия движения поезда. Например, силы, возникающие в автосцепке соседних вагонов, уравниваются друг друга. Внешние силы, такие как сила тяги, сила торможения и сила сопротивления, существенно влияют на условия движения поезда. Режимы движения поезда определяются равнодействующей, действующей на поезд в определенный момент времени. При движении в режиме тяги на поезд действует равнодействующая силы тяги и силы сопротивления движению; в режиме торможения – равнодействующая тормозной силы и силы сопротивления; на холостом ходу – сила сопротивления [2]. При всех трех режимах присутствует сила сопротивления движению. Эта сила присутствует всегда, независимо от того, едет ли поезд по горизонтальному прямому участку пути или там, где в плане есть кривые, а на продольном профиле запроектированы спуски или подъемы.

Сила сопротивления движению состоит из основного сопротивления движению, которое присутствует всегда, и дополнительных сопротивлений от кривой и от уклона,

которые могут появляться и исчезать в зависимости от плана и профиля железной дороги. Причинами присутствия основного сопротивления являются: трение в подшипниках, трение качения и скольжения на ободу колеса, удары на стыках и неровностях пути, сопротивление воздушной среды [7].

В соответствии с этими причинами при движении поезда по железнодорожному пути возникает шум, который заслуживает особого внимания на частотах от 20 Гц до 20 кГц, воспринимаемый человеческим ухом. Поэтому исследования по снижению сопротивления движению, а значит и уровня шума от движущихся поездов являются актуальными.

Относительная доля шума от колес и элементов пути в общем его уровне зависит от их конструктивных особенностей. Шпалы создают наибольший шум на низких частотах, рельсы в диапазоне средних частот, а колеса – на высоких частотах. Для достижения значительного общего снижения шума уменьшается шум от колебаний верхнего строения пути. Путь с низким уровнем шума наиболее эффективен в сочетании с малошумными колесами.

Причины существования основного сопротивления движению те же, что и вызывающие шум. Поэтому борьба с шумом от движущихся поездов способствует уменьшению основного сопротивления движению, что является актуальным, так как оно оказывает определенное влияние на массу состава грузового поезда.

Целью исследования является установление причин зависимости основного удельного сопротивления движению состава от типа вагонов, конструкции железнодорожного пути, скорости движения поезда, нагрузки, приходящейся на ось колесной пары, и путей уменьшения удельного сопротивления в общем сопротивлении движению.

Основная часть. Волны шума генерируются по одному из двух механизмов: вибрациями твердого тела или колебаниями давления воздуха. Для высокоскоростного движения характерен аэродинамический шум, генерируемый неустановившимися воздушными потоками, особенно в лобовых частях поездов, вагонных соединениях, на тележках, в токоприемниках. Однако механические составляющие все еще преобладают в общем шуме. Основным источником шума является контакт колеса и рельса. Шум качения вызывается неровностями поверхностей колеса и рельса в точке контакта, возбуждающими их относительные колебания. Колесо интенсивно вибрирует на разных резонансных частотах.

Шероховатости вызывают колебания в вертикальной плоскости на частотах более 1,5 Гц. Колебания рельса имеют характер продольных волн. Вибрации передаются с рельса на шпалы, балласт и грунт. Эти разнообразные колебания колеса и элементов пути вызывают шум, который распространяется по воздуху. Одним из путей снижения шума является уменьшение неровностей колес и рельсов путем внедрения на железных дорогах композиционных тормозных колодок для грузовых поездов. Такие колодки не вызывают появления шероховатости на поверхности колес в соответствующем диапазоне, тогда как чугунные колодки приводят к образованию волнообразных неровностей. Общепринятым является шлифование рельсов для удаления их волнообразного износа.

Исследование зависимости основного удельного сопротивления движению грузовых вагонов от нагрузки, приходящейся на ось колесной пары, скорости, типа пути выполняется применительно к составу грузового поезда, сформированного только из четырехосных вагонов, из восьмиосных вагонов и к поезду, в составе которого есть и восьмиосные и четырехосные вагоны на звеньевом и бесстыковом пути.

Основное удельное сопротивление движению различных типов вагонов на роликовых подшипниках и подшипниках скольжения на звеньевом и бесстыковом пути в зависимости от скорости движения и нагрузки на одиночную ось вагона определяется по формулам, приведенным в справочной литературе [8].

Подсчеты основного удельного сопротивления для груженых вагонов производятся при нагрузке на ось вагона $q_0 > 14$ т.

Восьмиосные вагоны имеют грузоподъемность 125 т, масса тары вагона 60 т, вагоны полностью загруженные. Грузоподъемность четырехосного вагона 61 т, масса тары 21 т, коэффициент полногрузности 0,95. Все вагоны оборудованы тормозами.

На основании исходных данных о каждой группе вагонов в составе определяется вес вагона брутто в тоннах, средняя нагрузка от оси вагона на рельсы и основное сопротивление движению состава. Если же состав сформирован из разнотипных вагонов (например, из четырехосных и восьмиосных), то определяются основное средневзвешенное сопротивление состава по формулам, приведенным в литературе [9].

Вариантные расчеты основного сопротивления движению w''_0 вагонов выполняются при следующих значениях нагрузки q_0 , приходящейся на ось колесной пары: 15,0; 17,5; 20,0; 22,5 и 25,0 т.

Так как сопротивление движению вагонов зависит не только от q_0 , но и от скорости движения V , то с целью выявления влияния q_0 на сопротивление движению вагонов при различных значениях скорости расчеты производятся при двух ее значениях (25 и 100 км/ч) по бесстыковому и звеньевому пути. Результаты расчетов по вариантам при скорости $V = 100$ км/ч представлены в таблице.

Таблица. – Основное сопротивление движению при различных q_0 , $V = 100$ км/ч

Показатель						
q_0 , т/ось	$w''_{o(4)}$, Н/кН	$w''_{o(8)}$, Н/кН	$\Delta w''_{o(4)}$, Н/кН	$\Delta w''_{o(4)}$, %	$\Delta w''_{o(8)}$, Н/кН	$\Delta w''_{o(8)}$, %
Звеньевой путь						
15	3,24	2,75	0	0	0	0
17,5	2,87	2,46	0,37	11,4	0,29	10,5
20	2,6	2,24	0,64	19,8	0,51	18,5
22,5	2,33	2,04	0,91	28	0,71	25,8
25	2,22	1,93	1,02	31,5	0,82	29,8
Бесстыковой путь						
15	2,83	2,4	0	0	0	0
17,5	2,52	2,16	0,31	10	0,24	11,1
20	2,3	1,98	0,53	18,7	0,42	17,5
22,5	2,12	1,85	0,71	25,1	0,55	22,9
25	2,0	1,72	0,83	29,3	0,68	27,1

Индекс (4) – для четырехосных вагонов; индекс (8) – для восьмиосных вагонов.

Аналогичные расчеты по определению основного удельного сопротивления движению состава выполнены и при скорости 25 км/ч при движении по звеньевому и бесстыковому пути.

В таблице показано влияние типа вагонов и конструкции пути на основное сопротивление движению состава: абсолютные значения изменения основного сопротивления движению состава, сформированного полностью из четырехосных вагонов или восьмиосных, от нагрузки, приходящейся на ось колесной пары. Абсолютное измене-

ние основного удельного сопротивления движению $\Delta w''_o$ колеблется от 0,24 до 1,02 Н/кН, относительное $\Delta w''_o$, % изменяется до 31,5 %.

Представляет определенный интерес не абсолютное изменение основного сопротивления движению, а относительное. При увеличении массы, приходящейся на одиночную ось вагона, с 15 до 25 т/ось основное сопротивление возрастает на 31,5 % при скорости 100 км/ч и на 16,2 % при скорости 25 км/ч, то есть более интенсивное увеличение происходит при больших скоростях движения. На бесстыковом пути основное сопротивление движению меньше при расчетной скорости, чем на звеньевом пути (рисунки 1 и 2).

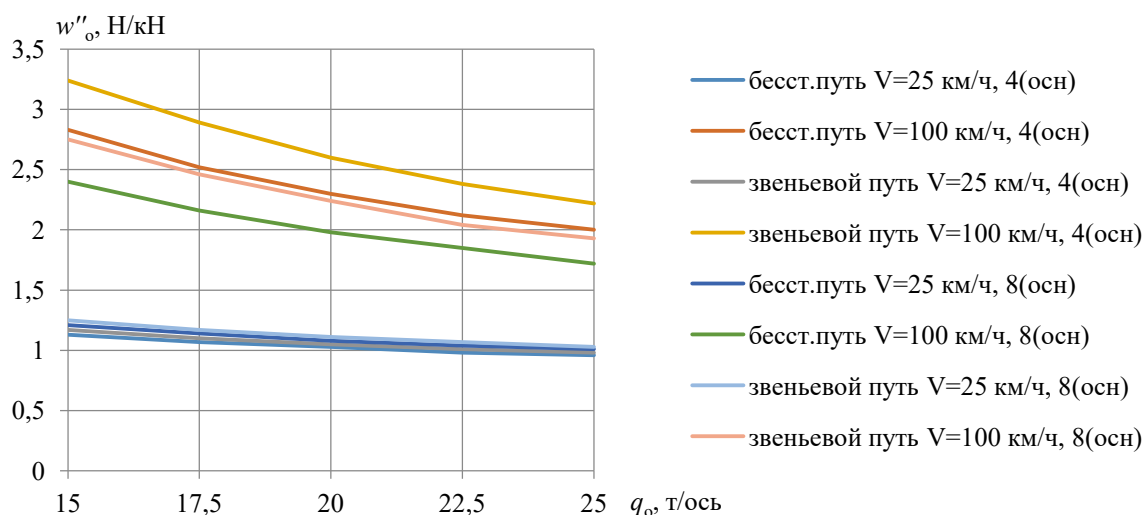


Рисунок 1. – График зависимости основного сопротивления движению вагонов от нагрузки, приходящейся на ось колесной пары

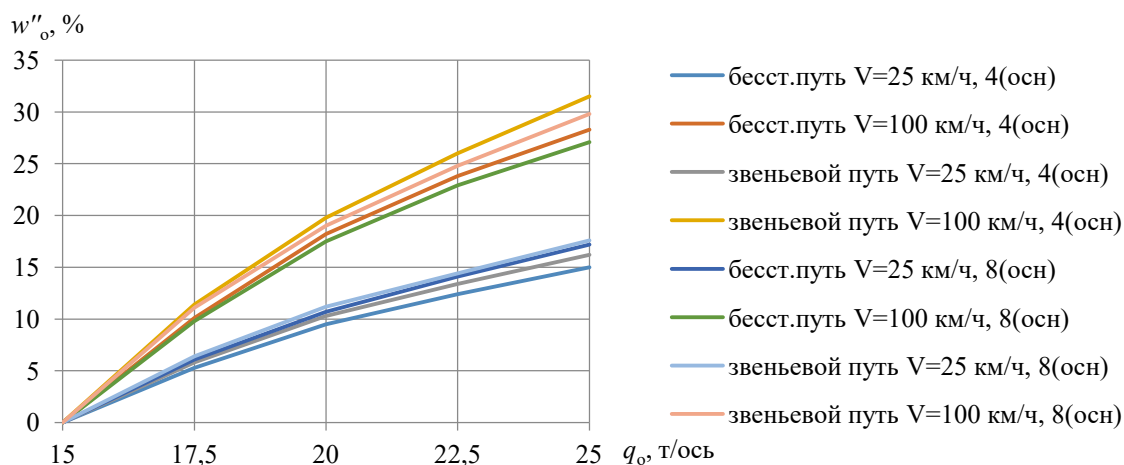


Рисунок 2. – Относительные изменения сопротивления движению вагонов в зависимости от нагрузки, приходящейся на ось колесной пары

Увеличение основного сопротивления движению состава приводит к уменьшению расчетной массы состава, что крайне нежелательно, так как в настоящее время существует твердая тенденция увеличения массы состава, так как на дорогах эксплуатируются более мощные локомотивы, повышаются скорости движения, вводятся большегрузные вагоны, тяжеловесные и длинносоставные поезда [9].

Работа сил сопротивления в значительной мере преобразуется в энергию звуковых волн, которая формирует шум.

Два очень важных и взаимосвязанных параметра, которые влияют на распространение путевого шума, – это жесткость рельсовых подкладок и степень затухания вибраций вдоль рельса. Жесткие подкладки требуют совпадения колебаний рельса и шпалы в широком диапазоне частот. Мягкие подкладки акустически изолируют шпалу на частотах выше некоторого порогового уровня. Чем меньше жесткость подкладки, тем ниже этот частотный порог. Поэтому мягкие подкладки эффективно изолируют шпалы и основание пути от вибраций рельсов, уменьшая составляющую шума, вызываемую колебаниями шпал. Поскольку расчетная функция подкладки частично состоит в защите шпалы и балласта от высоких ударных нагрузок, в последние годы все чаще используют более мягкие подкладки.

Более мягкие подкладки вызывают вибрации рельса, распространяющиеся с меньшим ослаблением. Поскольку при проходе каждого колеса колебания распространяются по все большей длине рельса, последний генерирует больше шума. Поэтому достигается компромисс между изолирующими и ослабляющими свойствами подкладки.

Во-первых, имеется тенденция к использованию в таких конструкциях более мягких рельсовых креплений для получения упругости, обычно создаваемой балластом. Во-вторых, плитное основание имеет твердую шумоотражающую поверхность, тогда как поверхность балласта обладает звукопоглощающими свойствами [10].

Наносится поглощающий материал на верхнюю поверхность плиты. Эта мера снижает шумоизлучение с поверхности. Ограждение рельсов, например, с помощью интегрированных в конструкцию пути мини-барьеров помогает достичь дополнительного ослабления шума. Указанными мерами снижается шум пути на плитном основании до уровня шума пути на балласте. Для уменьшения корпусного шума рассматриваются изолирующие возможности пути в целом. Стандартный путь на балласте содержит два уровня смягчения – подкладки и балласт. Мягкие подрельсовые подкладки или верхний слой основания пути способствует изоляции пути от грунта. Эффективно уменьшение неподрессоренных масс подвижного состава. Резонансная частота определяется жесткостью пути и масс, которые она поддерживает, включая неподрессоренные массы колесных пар. Обычно резонансная частота балластного пути располагается между 50 и 100 Гц в зависимости от характеристик основания, толщины и состояния балласта.

Колебания, передаваемые на грунт под верхним строением пути, распространяются на значительные расстояния. Низкочастотные колебания грунта в большинстве случаев возбуждаются тяжеловесными поездами на открытых участках.

Практическая значимость. Уменьшение уровня шума влечет за собой уменьшение основного сопротивления движению, от которого зависит масса состава грузового поезда. Разработанные рекомендации позволяют оценить уменьшение основного сопротивления движению, увеличение массы состава при этом и дать рекомендации о возможности движения поезда повышенной массы по расчетному подъему без дополнительных средств, таких как, например, разгонное толкание для преодоления расчетного подъема.

Выводы. Исследование основного удельного сопротивления состава показало, что оно является главным источником шума в конструкции «колесо - рельс» на железной дороге. Одним из путей снижения шума является уменьшение неровностей колес и рельсов путем внедрения на железных дорогах композиционных тормозных колодок для грузовых поездов. Такие колодки не вызывают появления шероховатости на по-

верхности колес в соответствующем диапазоне, тогда как чугунные колодки приводят к образованию волнообразных неровностей. Используется шлифование рельсов для удаления их волнообразного износа. Путь с низким уровнем шума наиболее эффективен в сочетании с малошумными колесами.

Обобщены основные причины существования основного сопротивления движению состава грузового поезда (наличие трения в подшипниках, трения качения и скольжения на ободе колеса, ударов на стыках и неровностях пути, сопротивления воздушной среды), и установлена прямая зависимость между ними и причинами возникновения шума в системе «колесо-рельс» на частотах от 20 Гц до 20 кГц, воспринимаемых человеческим ухом, то есть, уменьшая шум, будет соответственно уменьшаться и основное сопротивление движению состава.

Анализ источников возникновения шума от колес и элементов пути в общем его уровне показал, что шпалы создают наибольший шум на низких частотах, рельсы в диапазоне средних частот, а колеса – на высоких частотах. Для достижения значительного общего снижения шума уменьшается шум от колебаний верхнего строения пути.

Установлено относительное изменение основного сопротивления движению вагонов в зависимости от различных факторов, которое используется для определения величины повышения массы состава, что способствует затруднению преодоления расчетных подъемов и требует дополнительных мер проезда таких участков.

Список использованных источников

1. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Беларусь на 2016-2020 годы. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 28.04.2016 № 345 с изменениями и дополнениями. – Режим доступа: pravo.by. – Дата доступа: 06.09.2019.

2. Анисимов, В.А. Теория и практика проектирования развития региональной сети железных дорог с учетом изменения облика и мощности станций и узлов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / В.А. Анисимов; Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. – Хабаровск, 2005. – 48 с.

3. Бушуев, Н.С. Особенности железнодорожных направлений перспективных для организации скоростного и высокоскоростного движения поездов / Н.С. Бушуев, Н.В. Левадная, Д.О. Миненко // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов: сб. ст. по результатам международной конференции / Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Петербургский гос. ун-т путей сообщ.»; под ред. Е.П. Дудкина, Е.С. Свинцова. – СПб., 2011. – С. 77-80.

4. Верховых, Г.В. Железнодорожные пассажирские перевозки: монография / Г.В. Верховых, А.А. Зайцев, А.Г. Котенко. – СПб.: Северо-Западный региональный центр «РУСИЧ», «Паллада-медиа», 2012. – 520 с.

5. Гончарук, С.М. Принятие решений при проектировании облика и мощности сети железных дорог (сетевой подход): в 3 частях / С.М. Гончарук, А.В. Гавриленков, В.С. Шварцфельд. – Хабаровск: ДВГУПС, 2003. – Часть 1: Методология формирования альтернатив облика и мощности сети железных дорог с учетом надежности ее функционирования: монография. – 178 с.

6. Анисимов, В.В. Планирование переустройства железнодорожного направления на основе логико-сетевого моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук:

05.13.16 / В.В. Анисимов; Дальневосточ. гос. ун-т путей сообщения. – Хабаровск, 2000. – 24 с.

7. Турбин, И.В. Изыскания и проектирование железных дорог: учеб. для вузов / И.В. Турбин. – М.: Транспорт, 1989. – 479 с.

8. Правила тяговых расчетов для поездной работы / Министерство путей сообщения. – М.: Транспорт, 1985 – 287 с.

9. Довгелюк, Н.В. Изыскания и проектирование железных дорог: учеб. пособие для вузов / Н.В. Довгелюк, Г.В. Ахраменко, И.М. Царенкова. – Гомель: БелГУТ, 2013. – 333 с.

10. Bierwirth, C. On transport service selection in intermodal rail/road distribution networks [Text] / C. Bierwirth, T. Kirschstein, F. Meisel // BuR-Business ReseTarch. – 2012. – № 5. – P. 198-219.

Информация об авторах

Масловская Марина Александровна – аспирант УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Довгелюк Наталия Владимировна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Шагулин Владимир Сергеевич – студент УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Information about the authors

Maslovskaya Marina Aleksandrovna – Post-graduate Student, Student Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Dovgelyuk Natalia Vladimirovna – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Design, Construction and Operation of Transport Facilities”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Shagulin Vladimir Sergeevich – Student, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: ndov1948@mail.ru.

Поступила в редакцию 19.05.2020 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.193:669.15.056.99-194.3-023.871(045)

Пантелеенко Ф.И.¹, Карпец М.Н.², Белоцерковский М.А.³, Сосновский А.В.³¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь²ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь³ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, В КОНТАКТЕ С АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ, ИСПОЛЪЗУЕМЫМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Аннотация. Как правило, в химических процессах из-за специфики производства и наличия агрессивных сред применяют оборудование из дорогостоящих высоколегированных сталей различных классов. В ряде случаев более экономичным будет применение металлических коррозионно-износостойких покрытий, нанесенных на менее дорогостоящую основу, взамен применения монолитных высоколегированных сталей. По экономическим составляющим среди методов по нанесению покрытий можно выделить метод гиперзвуковой металлизации, позволяющий наносить высокоплотные металлические покрытия из относительно недорогих и доступных проволочных материалов. В данной работе были подобраны наиболее применимые для калийной отрасли проволочные материалы для нанесения покрытий, исследованы структура и химический состав покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации из высоколегированных проволочных материалов различных классов, проведены испытания коррозионной стойкости покрытий в контакте с агрессивными средами при производстве калийных удобрений.

Ключевые слова: гиперзвуковая металлизация, электродуговая металлизация, металлические покрытия, коррозионная стойкость металлических покрытий, структура покрытий, пористость покрытий.

Panteleenko F.I.¹, Karpets M.N.², Belotserkovsky M.A.³, Sosnovsky A.V.³¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²JSC «Belaruskali», Soligorsk, Belarus³Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus**STUDY OF CORROSION RESISTANCE OF COATINGS OBTAINED BY THE METHOD OF HYPERSONIC METALIZATION FROM HIGH-ALLOYED WIRE MATERIALS, IN CONTACT WITH ANGRESSIVE POTASH FERTILIZER PRODUCTION**

Abstract. As a rule, in chemical production, due to the specifics of production and the presence of aggressive environments, equipment is used from expensive high-alloy steels of various classes. In some cases, it will be more economical to use metal corrosion-resistant coatings deposited on a less expensive basis instead of using monolithic high alloy steels. According to the economic components, among the methods for applying coatings, we can distinguish the method of hypersonic metallization, which makes it possible to apply high-density metal coatings from relatively inexpensive and

affordable wire materials. In this work, we selected the most applicable wire materials for the potash industry for coating, investigated the structure and chemical composition of coatings obtained by hypersonic metallization from high-alloyed wire materials of various classes, and tested the corrosion resistance of coatings in contact with aggressive media in the production of potash fertilizers.

Keywords: *hypersonic metallization, electric arc metallization, metal coatings, corrosion resistance of metal coatings, coating structure, porosity of coatings.*

Введение. Анализ статистических данных о выходе из строя технологического оборудования вследствие коррозионных повреждений показывает, что разрушения из-за общей коррозии составляют 31 %, из-за коррозионного растрескивания – 22 %, из-за точечной коррозии – 16 %, из-за межкристаллитной коррозии – 10 %, из-за кавитации и эрозии – 9 %, из-за коррозионной усталости – 2 %, из-за других видов коррозии – 10 % [1].

Кроме прямых потерь от коррозии имеются косвенные потери, связанные с простоями оборудования, выпуском загрязненной продукции, утечкой ценных или вредных продуктов в окружающую среду и т.д. Как правило, косвенные затраты значительно выше затрат на мероприятия по борьбе с коррозией. Таким образом, при существующей тенденции развития химической промышленности эффективное снижение стоимости оборудования, затрат на надежную эксплуатацию и повышение долговечности работы оборудования являются важными задачами.

Ярким представителем химической отрасли является ОАО «Беларуськалий» – одно из крупнейших производителей и экспортеров калийных удобрений в мире. Значительное количество деталей машин при производстве калийных удобрений (втулки, перемешивающие устройства и др.) работают в условиях интенсивного изнашивания и коррозии. По условиям эксплуатации данные детали изготавливают из дорогостоящих высоколегированных хромоникелевых сталей (аустенитного и аустенитно-ферритного классов). Применение коррозионно-износостойких покрытий, нанесенных на менее дорогостоящую основу, в ряде случаев будет более экономичным, чем применение монолитных высоколегированных сталей.

Еще в советские годы учеными в области газотермических способов упрочнения деталей проводились исследования возможности использования металлических покрытий, полученных методами газотермического напыления, для защиты деталей, работающих в агрессивных средах калийных фабрик. По результатам исследований было определено, что коррозионный износ образцов с покрытиями проходит в основном по границе покрытия и подложки, что связано со сквозной пористостью наносимых слоев. При этом сами покрытия обладают совершенной стойкостью в агрессивных средах калийных фабрик, и их можно использовать для защиты от коррозионного износа [2]. Таким образом, актуальной является задача поиска метода газотермического напыления, позволяющего получить высокоплотные покрытия.

Подготовка экспериментальных образцов. Целью данной работы является экспериментальное исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации (ГМ) из высоколегированных проволочных материалов различных классов, в контакте с агрессивными средами при производстве калийных удобрений. Выбор метода ГМ обусловлен тем фактом, что данная технология позволяет наносить высокоплотные металлические покрытия (пористость 1-4 %), используя в качестве присадочного материала проволочные электроды [3, 4], что значительно дешевле по сравнению с порошками. В процессе ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропановоздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при

температуре 2200 К, а скорость полета распыляемых частиц, формирующих покрытие, около 500 м/с [5].

Для проведения исследований покрытия наносили методом ГМ на стальные пластины марки Ст3 размерами 80×40×5 мм (рисунок 1). Учитывая химический состав и



Рисунок 1. – Общий вид образцов

агрессивный характер технологических сред, материал покрытий должен обеспечивать коррозионную стойкость. Кроме того, в рассматриваемых технологических средах содержатся хлор-ионы, провоцирующие точечную коррозию, поэтому для уменьшения точечной коррозии и повышения общей стойкости необходимо применять коррозионно-стойкие материалы, в состав которых входит молибден [6]. По результатам анализа характеристик технологических сред, особенностей эксплуатации оборудования и анализа применяемых сварочных материалов в качестве материала покрытий, обеспечивающих коррозионно-стойкие свойства, была выбрана стальная проволока сплошного сечения следующих марок: ER316LSi, Ø1,2 мм; ER2209, Ø1,2 мм; ER347, Ø1,2 мм; 95X18, Ø1,6 мм (таблица 1).

Таблица 1. – Химический состав и механические свойства применяемых проволок [7-9]

Марка проволоки	Массовая доля химических элементов, %									Предел прочности, МПа	Предел пластичности, МПа	Относительное удлинение, %
	Mn	Mo	Cu	C	Si	Ni	Cr	Ti	Nb			
ER316LSi	1,80	2,60	0,12	0,01	0,9	12,2	18,4	-	-	560	400	37
ER2209	1,70	3,30	<0,30	<0,025	0,50	8,50	22,5	-	-	765	600	28
ER347	1,70	0,10	0,10	0,04	0,7	9,8	19	-	0,6	640	440	37
95X18	<0,8	-	<0,30	0,96	<0,8	<0,6	18,5	<0,2	-	770	420	15

Нанесение покрытий на образцы выполнялось при следующих режимах: сила сварочного тока – 200 А, напряжение дуги – 32 В, скорость подачи проволоки – 3,5 м/мин, давление сжатого воздуха – 0,35 МПа, давление пропан-бутановой смеси – 0,35 МПа, дистанция напыления – 100-150 мм.

Для активации поверхности перед нанесением покрытий рабочая поверхность пластин подвергалась абразивно-струйной (дробеструйной) обработке смесью, состоящей из корунда 14А F12 (~50 %) и колотой дроби ДЧК – 1,4 (~50 %), при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

После нанесения покрытий для определения степени выгорания легирующих элементов был проведен спектральный анализ. Спектральный анализ выполнялся с применением рентгено-флуоресцентного спектрометра NITON XL2. Погрешность измерений: в диапазоне массовых долей от 0,10 % до 0,50 % составляет ±30 %; в диапазоне массовых долей от 0,50 % до 1,00 % составляет ±20 %; в диапазоне массовых долей свыше 1,00 % составляет ±15 %. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Химический состав покрытий после напыления

№ образца	Материал покрытия	Толщина покрытия, мм	Массовая доля химических элементов, %				
			Fe	Cr	Ni	Mo	Mn
1	ER316LSi	1,7-1,8	66,70	17,84	11,76	2,71	0,820
2	ER2209	1,2-1,4	65,30	21,92	8,27	3,37	0,680
3	ER347	1,1-1,6	70,60	17,99	9,79	0,16	0,632
4	95X18	1,7-2,6	80,70	17,85	0,33	-	0,390

Из таблицы 2 видно, что во всех образцах наблюдается уменьшение массовой доли марганца в пределах 50-60 % от его содержания. Учитывая, что марганец является элементом раскислителем, можно предположить, что половина марганца уходит на процессы раскисления расплавленных капель в процессе напыления. Косвенным подтверждением этому является также факт максимальной (1,6 %) пористости в покрытии из проволоки 95X18, содержащей минимальное, т.е. недостаточное количество раскислителя марганца. Все это указывает на необходимость более детальных исследований роли элементов-раскислителей в дальнейшей работе. Массовая доля остальных элементов практически не изменилась.

Экспериментальное исследование образцов. С целью определения пористости покрытий и исследования их структуры применялись дублирующие образцы. Исследование выполняли с использованием микроскопа МИ-1. Для получения и анализа изображений применялось программное обеспечение «SIAMS 800» (рисунки 2-5). Травление образцов не выполнялось.

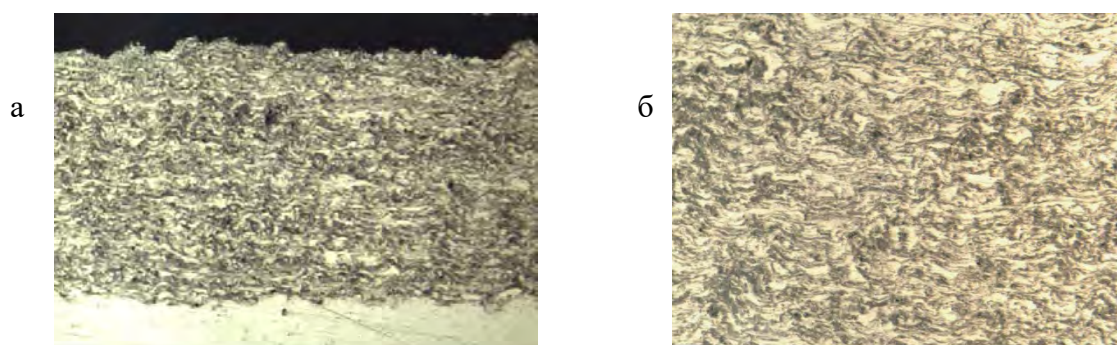
а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 200$

Рисунок 2. – Микроструктура образца № 1

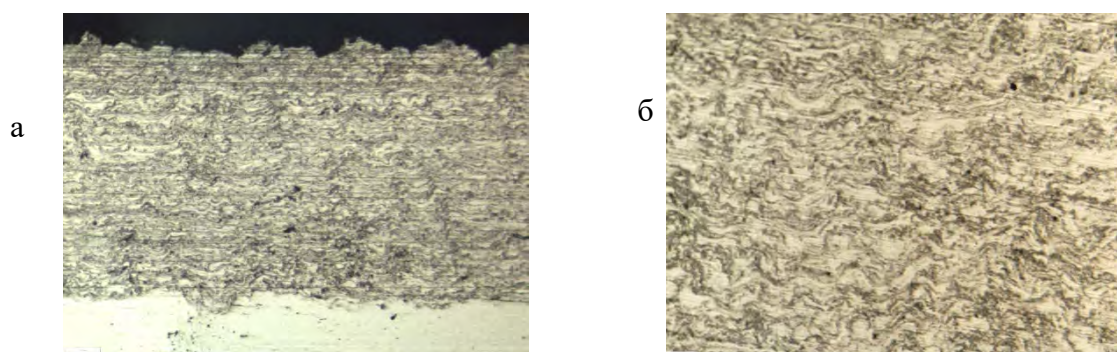
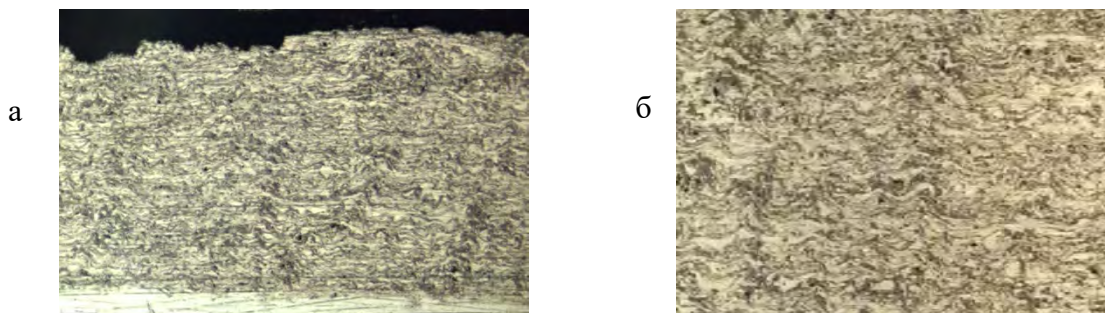
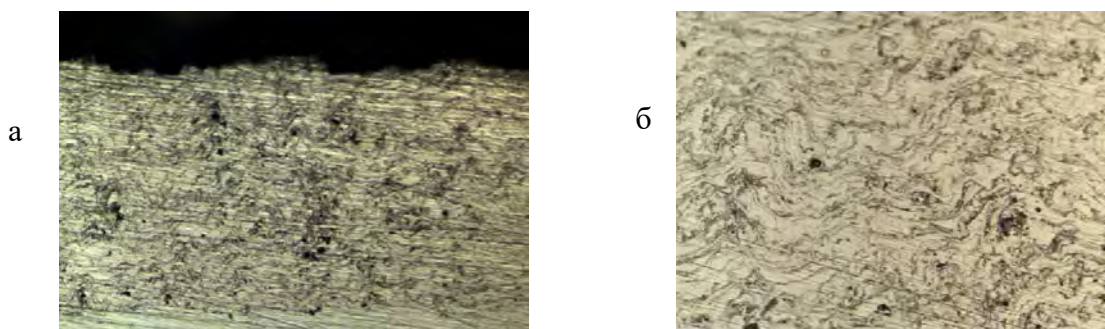
а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 200$

Рисунок 3. – Микроструктура образца № 2



а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 200$
Рисунок 4. – Микроструктура образца № 3



а – увеличение $\times 100$; б – увеличение $\times 200$
Рисунок 5. – Микроструктура образца № 4

По результатам металлографических исследований выявлено, что частицы в покрытии всех образцов имеют сильно деформированную форму (рисунки 2-5). Все покрытия выглядят достаточно плотными. Пористость покрытий составляет: в образце № 1 до 0,6 %; в образце № 2 до 1,3 %; в образце № 3 до 0,9 %; в образце № 4 до 1,6 %. Большее значение пористости при применении проволоки 95X18 (образец № 4) можно объяснить большим диаметром проволоки (1,6 мм) и меньшим содержанием элементов-раскислителей в ее составе.

Образцы были установлены на технологической линии в мешалке шнековой ОАО «Беларуськалий». Крепление образцов осуществлялось к раскоу ротора шнековой мешалки (рисунок 6).



Рисунок 6. – Место установки образцов

Изначально планировалось выдерживать образцы в испытательной среде в течение 1 года для определения скорости коррозии согласно [6, 10]. Спустя 2 месяца испытаний при осмотре образцов было обнаружено следующее.

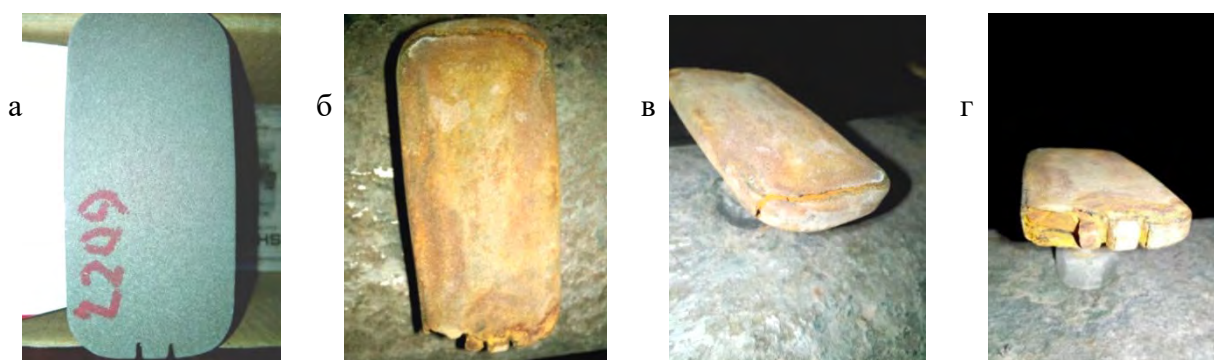
Образец № 1: на поверхности покрытия отсутствуют следы коррозионного износа, трещин не обнаружено. На торцевых поверхностях присутствует незначительный эрозионный износ (рисунок 7).



а – до испытаний; б, в – после двух месяцев испытаний

Рисунок 7. – Образец № 1

Образец № 2: на поверхности покрытия отсутствуют следы коррозионного износа, на торцевой поверхности длинной стороны имеются 3 поперечные трещины. На торцевых поверхностях образца (короткая сторона) покрытие разрушено, пластина, являющаяся основой, скорродировала на ~3 % от всей площади образца (рисунок 8). Разрушение образца № 2 можно объяснить более низкой пластичностью покрытия по причине низкого содержания никеля в сравнении с образцом № 1. Тем не менее, по сравнению с образцами № 3 и № 4, образец № 2 в меньшей степени подвергся разрушению.

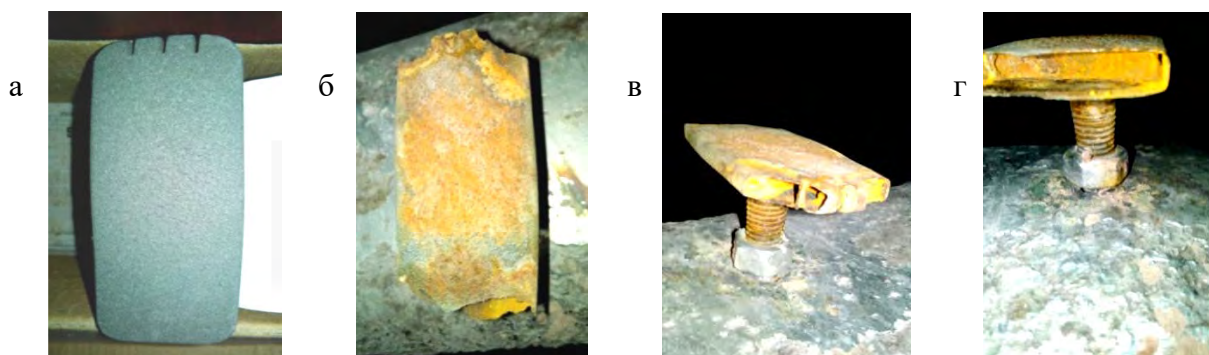


а – до испытаний; б, в, г – после двух месяцев испытаний

Рисунок 8. – Образец № 2

Образец № 3: на поверхности покрытия отсутствуют следы коррозионного износа, на торцевой поверхности длинной стороны имеются 4 поперечные трещины. На торцевых поверхностях образца (короткая сторона) покрытие разрушено, пластина, являющаяся основой, скорродировала на ~35 % от всей площади образца (рисунок 9). Разрушение образца № 3 можно объяснить более низкой пластичностью покрытия по причине низкого содержания никеля и полного отсутствия молибдена в сравнении с

образцом № 1. Тем не менее, по сравнению с образцом № 4, образец № 3 в меньшей степени подвергся разрушению.



**а – до испытаний; б, в, г – после двух месяцев испытаний
Рисунок 9. – Образец № 3**

Образец № 4: на всей поверхности покрытия присутствуют следы коррозионного износа, на торцевых поверхностях эрозионного износа, на торцевой поверхности длинной стороны имеются продольные трещины по всей длине оставшегося образца. На торцевой стороне образца (короткая сторона) покрытие разрушено, пластина, являющаяся основой, скорродировала на ~70 % от всей площади образца (рисунок 10). Разрушение образца № 4 можно объяснить полным отсутствием никеля и молибдена в сравнении с образцом № 1. Образец № 4 по сравнению с остальными образцами в наибольшей степени подвергся коррозионному и эрозионному разрушению.

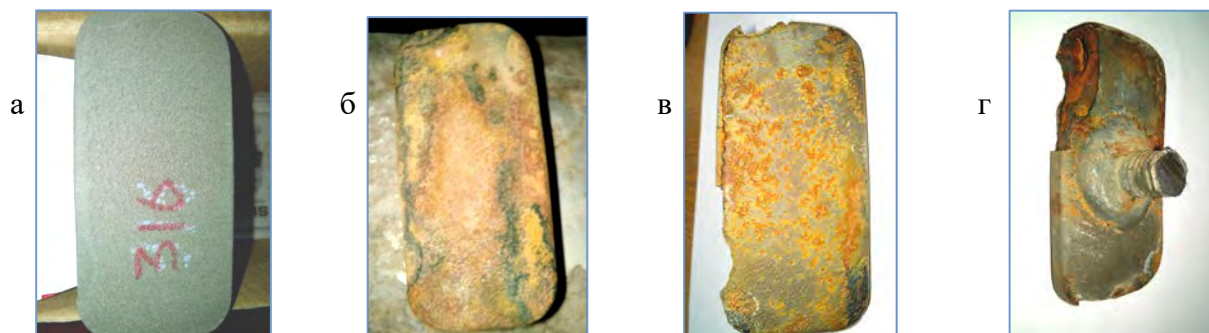


**а – до испытаний; б, в – после двух месяцев испытаний
Рисунок 10. – Образец № 4**

На основании результатов осмотра образцы № 2, № 3, № 4 были сняты с испытаний по причине разрушения покрытия и нецелесообразности их дальнейших испытаний. Образец № 1 остался для проведения дальнейших испытаний.

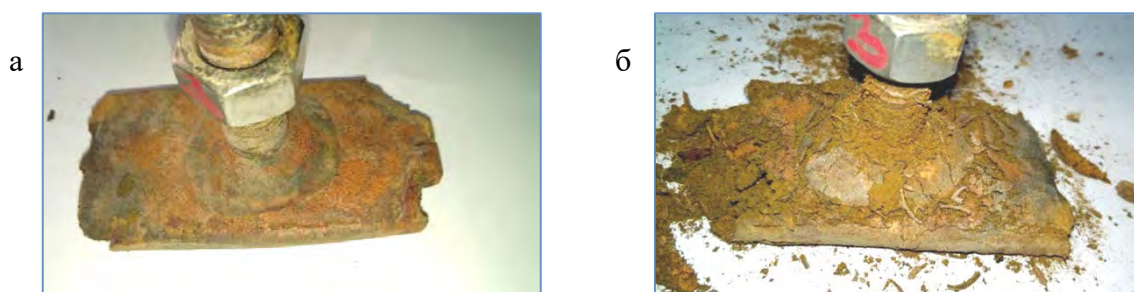
Спустя 3,5 месяца испытаний образец № 1 был снят с испытаний по причине разрушения покрытия и нецелесообразности его дальнейших испытаний. При его осмотре было обнаружено следующее: на поверхности покрытия отсутствуют следы коррозионного износа, на торцевых поверхностях присутствуют следы эрозионного износа, на торцевой поверхности длинной стороны имеются 2 поперечные трещины, на лицевой стороне имеется продольная трещина, переходящая на тыльную сторону и рас-

положенная практически по всему периметру образца. На торцевых поверхностях образца (короткая сторона) покрытие разрушено, пластина, являющаяся основой, скорродировала на ~4 % от всей площади образца (рисунок 11).



**а – до испытаний; б – после двух месяцев испытаний;
в, г – после трех с половиной месяцев испытаний
Рисунок 11. – Образец № 1**

Механизм разрушения покрытий всех образцов можно описать следующим образом: учитывая геометрические особенности образцов и направление вращения ротора, торцевые поверхности были наиболее уязвимыми с точки зрения эрозионной стойкости. По этой причине через некоторое время в испытательной среде, содержащей твердую фракцию, происходило незначительное разрушение покрытия на торцевых поверхностях образцов, в месте разрушения начинала корродировать стальная основа, коррозия начинала распространяться по границе основа–покрытие с образованием продуктов коррозии, продукты коррозии увеличивали объем образца под покрытием, далее происходило растрескивание покрытия за счет увеличения объема стальной основы, и, как следствие, коррозия прогрессировала на участках с нарушением покрытия по аналогичному механизму. В образце № 4, кроме описанного выше механизма разрушения, наблюдалось также коррозионное разрушение покрытий по причине не соответствующего испытываемой среде химического состава покрытия. Покрытия образцов № 1, № 2, № 3 показали лучшую по сравнению с образцом № 4 коррозионную стойкость в испытываемой среде. Однако после извлечения образца № 3 из испытательной среды и нахождения его на открытом воздухе в течение двух недель покрытие начало интенсивно корродировать и разрушаться (рисунок 12).



**а – после двух недель нахождения на воздухе;
б – после шести недель нахождения на воздухе
Рисунок 12. – Образец № 3**

Таким образом, из всех испытываемых покрытий наиболее стойкими оказались покрытия образцов № 1, № 2.

Выводы. По результатам проведенных испытаний можно установить, что покрытия, нанесенные с применением проволок ER316LSi и ER2209 методом ГМ, являются наиболее коррозионностойкими в растворах хлористого натрия и хлористого калия. Позитивным фактором, обеспечивающим более высокую коррозионную стойкость покрытий из этих проволок в среде, содержащей ионы хлора, является повышенное (2,6-3,3 %) содержание молибдена. Пористость покрытия из этих проволок не превышает 1,3 %. Рабочий ресурс данных покрытий до начала разрушения составил 2-3 месяца, после которого за счет эрозионного износа от твердой фракции, содержащейся в испытательной среде, они были повреждены. Для увеличения рабочего ресурса данных покрытий необходимо увеличение их износостойкости. Учитывая, что испытания проводились в наиболее жестких условиях (агрессивная среда, вращение образцов в жидкой среде с наличием твердой фракции), имеет смысл проведение подобных испытаний в агрессивной среде при статичном состоянии образцов. Покрытия, нанесенные с применением проволок ER347 и 95X18, являются недостаточно стойкими в агрессивных средах производства калийных удобрений. Пористость покрытия из проволоки марки ER347 составляет 0,9 %, из проволоки марки 95X18 – 1,6 %.

Список использованных источников

1. Фокин, М.Н. Защитные покрытия в химической промышленности / М.Н. Фокин, Ю.В. Емельянов. – М.: Химия, 1981. – 304 с.
2. Кибалко, А.А. Исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом газотермического напыления в средах, характерных для производства калийных удобрений / А.А. Кибалко, В.Г. Сवादковский, П.И. Папковский // Экспресс-информация. Отечественный производственный опыт. Химическая промышленность и промышленность по производству минеральных удобрений. Серия эксплуатация, ремонт, защита от коррозии оборудования и сооружений. – Вып. 9. – М.: НИИТЭХИМ, 1984.
3. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. 4365 Респ. Беларусь, МПК7 В05В7/20 / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко; заявитель Институт надежности машин НАН Беларуси. – № а19990698; заявл. 12.07.99; опубл. 30.03.02 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 1 (32) – С. 94.
4. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 4 (49). – С. 48-54.
5. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: Евразийский патент 024778, МПК В05В7/18, В05В7/22 / М.А. Белоцерковский, А.А. Дюжев, А.С. Прядко, А.Е. Черепко, В.А. Скворцов, А.В. Сосновский; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси». – № 201301243; заявл. 30.09.13; опубл. 31.10.2016 // Евразийское патентное ведомство. – 2016.
6. Воробьева, Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств / Г.Я. Воробьева. – 2-е изд. пер. и доп. – М.: Химия, 1975. – 816 с.
7. Компания ESAB // Продукция и решения [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Дата доступа: 29.09.2019.

8. Центральный металлический портал РФ // Марки стали и сплавы. Сталь марки 95X18 [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/stn/95X18. – Дата доступа: 29.09.2019.

9. Износостойкость напыленных покрытий из сталей различных классов / В.А. Кукареко [и др.] // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сб. ст. III Междунар. науч.-практич. конф., Минск, 23-24 мар. 2017 г. / БГАТУ. – Минск, 2017. – С. 239-241 / Репозиторий Белорусского государственного аграрного технического университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rep.bsatu.by/handle/doc/758>. – Дата доступа: 21.04.2019.

10. Туфанов, Д.Г. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов: справочник / Д.Г. Туфанов. – 4-е изд. – М.: Металлургия, 1982. – 352 с.

Информация об авторах

Пантелеенко Федор Иванович – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: panteleyenkofi@tut.by.

Карпец Максим Николаевич – магистр технических наук, аспирант Белорусского национального технического университета, заместитель начальника лаборатории технической диагностики и наладки управления автоматизации, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: m.karpets@kali.by.

Белотсерковский Марат Артемович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (ул. Академическая, 12, 220027, г. Минск, Беларусь), e-mail: mbelotser@gmail.com.

Сосновский Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (ул. Академическая, 12, 220027, г. Минск, Беларусь), e-mail: sosnovskij@inbox.ru.

Information about the authors

Panteleenko Fedor Ivanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department “Powder Metallurgy, Welding and Technology of Materials”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: panteleyenkofi@tut.by.

Karpets Maxim Nikolaevich – Master (Engineering), Post-graduate Student of the Belarusian National Technical University, Deputy Head of the Laboratory for Technical Diagnostics and Adjustment of Automation Management, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: m.karpets@kali.by.

Belotserkovsky Marat Artemovich – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Gas Thermal Methods of Hardening of Machine Parts, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Academic Str., 220027, Minsk, Belarus), e-mail: mbelotser@gmail.com.

Sosnovsky Aleksey Valerievich – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Academic Str., 220027, Minsk, Belarus), e-mail: sosnovskij@inbox.ru.

Поступила в редакцию 20.05.2020 г.

УДК 621.822.5

Макеев В.В., Врублевская В.И.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ БЕЗДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ АНТИФРИКЦИОННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
ШИРОКОГО РАЗМЕРНОГО ДИАПАЗОНА**

Аннотация. В работе предложен способ формирования бездефектной структуры модифицированных древесных вкладышей подшипников скольжения, заключающийся в первоначальном качественном анализе древесной заготовки на наличие в ней пороков древесины, препятствующих ее оптимальному деформированию и заполнению смазочным материалом, а также исключении некондиционных участков и формировании на их месте клеевого шва, что в совокупности обеспечивает увеличение использования деловой древесины до 90 % и создает предпосылки для изготовления высококачественного древесного вкладыша подшипника скольжения за одну технологическую операцию торцово-прессового деформирования.

Ключевые слова: подшипник скольжения, модифицированная древесина, бездефектная структура.

Makeev V.V., Vrublevskaya V.I.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***METHOD OF FORMING A DEFECT-FREE STRUCTURE OF MODIFIED
WOOD INSERTS OF SLIDING BEARINGS OF THE WIDE SIZE RANGE**

Abstract. In this paper proposed the method of forming defect-free structure of modified wood bearings, which consists in the initial qualitative analysis of wood samples for the presence of wood defects preventing its optimal deformation and filling of lubricant, exclusion of non-conforming parcels and the formation in their place of the adhesive joint, that together provides an increase in the use of industrial wood up to 90 % and creates prerequisites for the production of high-quality wood inserts for sliding bearings in a single technological operation of deformation.

Keywords: sliding bearing, modified wood, defect-free structure.

Введение. Эксплуатация узлов трения многих машин и механизмов в различных отраслях промышленности осуществляется в абразивных, агрессивных и влажных средах. Во время их работы трудно избежать засорения узла трения твердыми абразивными частицами из воздуха, воды, различных рабочих сред. Конструктивно исключить попадание таких частиц в узел трения и минимизировать их влияние на развитие изнашивания дорого и сложно. В этом случае ресурс машин во многом определяется работоспособностью узлов трения [1]. Около 75 % всех отказов технологического оборудования и машин объясняется повышенным износом подвижных соединений [2].

Наиболее распространенным механизмом, который эксплуатируется в присутствии абразива, является транспортирующая техника. На пищевых, горнодобывающих, деревообрабатывающих, стекольных, металлургических, строительных, сельскохозяйственных предприятиях применяются различные виды транспортеров (шнековые, спиральные, скребковые, ленточные и др.). Во многих случаях узлы трения работают в условиях сильной запыленности. Выход их из строя происходит по причине выгорания смазки или попадания в узел твердых частиц пыли, окалины, загрязненной воды, продуктов транспортировки и т.п.

На горнодобывающих предприятиях для перемещения руды используются желобчатые ленточные транспортеры с трехроlikовой опорой. Длина одной транспортерной ленты достигает 1000 м. По ее длине устанавливаются роlikоопоры. Для обеспечения вращения корпуса роlikоопоры на ее оси запрессованы два закрытых подшипника качения. Для их герметизации предусмотрены крышки. Осмотр транспортера на предмет выявления неработоспособных роlikоопор производится, как правило, дважды в смену. Заклинивание подшипников происходит в случае попадания в них абразивных частиц. При этом корпус перестает вращаться, усилие протягивания транспортерной ленты значительно увеличивается, а сама лента изнашивается из-за трения по корпусу ролика.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что проблема обеспечения работоспособности узлов трения механизмов, эксплуатирующихся в абразивно-агрессивных и влажных средах, является очень актуальной. Одним из методов обеспечения работоспособности узла трения является применение износостойких антифрикционных материалов, способных работать в негерметизированных узлах трения в присутствии абразивных частиц.

Основная часть. Одним из лучших представителей антифрикционных материалов, работающих в абразивно-агрессивных средах, является прессованная модифицированная древесина [3-6]. Изготовление антифрикционного материала на основе древесины производится путем ее прессования и пропитки смазкой, которая аккумулируется в капиллярно-сосудистой системе и выделяется в контактную зону в процессе трения.

В Белорусском государственном университете транспорта предложен способ формирования антифрикционного материала на основе модифицированной древесины, заключающийся в торцовом деформировании древесной заготовки с одновременным ее неоднородным прессованием поперек волокон и последующей пропиткой смазочным материалом [4]. Разработанный способ позволяет получить формоустойчивый древесный вкладыш подшипника скольжения плотностью по поверхности трения 1300-1400 кг/м³ (степень прессования 59 %), твердостью 120-130 МПа (НВ).

Эффективное деформирование древесной заготовки по описанному методу возможно только при отсутствии в ней дефектов (сучков, свилякостей, трещин, деформаций по длине и др.). Кроме того, максимальный размер древесной заготовки, а значит, и подшипника на ее основе ограничен максимальным диаметром ствола древесины березы. Приведенные трудности ограничивают возможность изготовления крупногабаритных подшипников, значительно снижают процент использования деловой древесины.

Целью работы является разработка способа формирования бездефектной структуры модифицированной древесины антифрикционного назначения для изготовления высококачественных вкладышей подшипников скольжения широкого размерного диапазона за одну технологическую операцию деформирования.



Рисунок 1. – Подшипники с составным вкладышем, разделенным компенсаторами

Существующая технология предусматривает формирование за одну операцию деформирования древесных вкладышей по внутреннему диаметру поверхности трения $d \leq 25$ мм (длина заготовки $L \leq 170$ мм). Подшипники, древесные вкладыши которых по внутреннему диаметру превышают 25 мм, изготавливаются из нескольких заготовок. Их деформирование производится отдельно. В готовом подшипнике они разделяются компенсаторами, образуя составной вкладыш (рисунок 1).

Изготовление древесного вкладыша крупногабаритного подшипника из несколь-

ких заготовок обусловлено следующими причинами:

- согласно СТБ 1714 установлены номинальные размеры пиломатериалов по ширине: 60, 70, 80, 90, 100, 110, 130, 150, 180, 200 мм. Исходя из этих значений, принимается длина древесной заготовки для изготовления подшипника в случае использования для этой цели гостированных пиломатериалов;

- длина древесной заготовки ограничена диаметром ствола березы. Его наибольшее значение составляет 800 мм. Однако, как свидетельствует практика лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, под вырубку попадают деревья с диаметром ствола в комлевой части в среднем от 320 до 440 мм;

- заготовку необходимой длины зачастую возможно сформировать только из максимальных по ширине сердцевинных или центральных досок. Следует учитывать, что в бревнах диаметром 360 мм и выше не рекомендуется выпиливать центральные доски, а минимальная толщина сердцевинных досок должна быть ≈ 50 мм. Это объясняется тем, что сердцевина и отлупные трещины в годовых слоях (ГОСТ 2140), прилегающих к ней, снижают качество досок [7, с. 63].

Недостатками такой технологии изготовления являются:

- высокая трудоемкость. Для изготовления одного подшипника с диаметром по внутренней поверхности трения $d \geq 25$ мм необходимо произвести несколько операций деформирования с установкой компенсаторов;

- низкий процент использования деловой древесины. Из постава при раскросе бревна выбираются доски, максимальные по ширине и не имеющие пороков, для дальнейшего раскроя на заготовки для изготовления подшипника (рисунок 2);

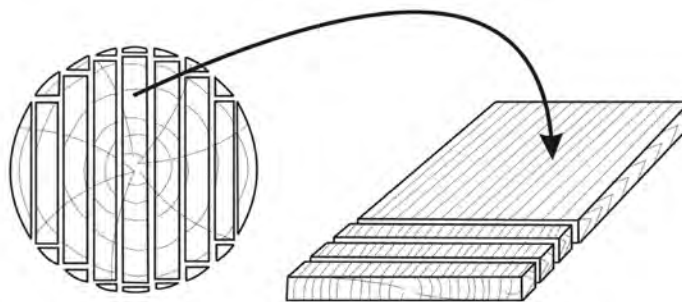


Рисунок 2. – Раскрой бревна и доски для изготовления древесной заготовки

- увеличенный производственный цикл из-за выполнения нескольких операций деформирования древесных заготовок и постановок компенсаторов;

- значительные трудности автоматизации производства.

В настоящей работе предлагается усовершенствовать технологию производства подшипников с целью уменьшения трудоемкости их изготовления и повышения качества. Поставленная задача решается за счет того, что необходимая древесная заготовка формируется из склеенных между собой малых древесных заготовок с расположением волокон в радиальном направлении. В результате выполнения этой операции возможно получить древесную заготовку с необходимыми геометрическими размерами и сформировать бескомпенсаторный древесный вкладыш подшипника (рисунок 3).

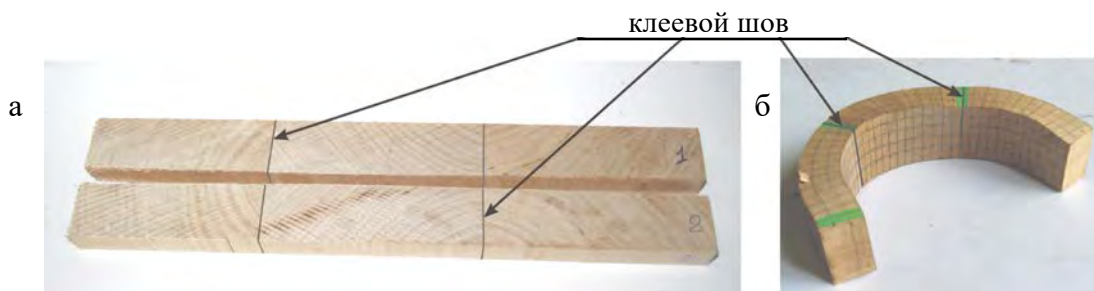


Рисунок 3. – Клееная древесная заготовка исходная (а) и в процессе деформирования (б)

Склеивание производится под давлением 0,5...0,8 МПа (выдержка 30-40 мин) клеем марки 303 фирмы «Клейберит» или поливинилацетатной дисперсией (ГОСТ 18992). Влажность заготовок должна составлять $W = 8 \pm 2 \%$. Разность влажности склеиваемых между собой заготовок не должна превышать 2 %.

Склеиваемые поверхности не должны иметь дефектов строгания (заколов, задиров, трещин), лаковых, масляных пятен и других загрязнений. Расход клея при этом составляет 130...150 г/м². Для выполнения операции склеивания не требуется изготавливать специальное оборудование. Прижим склеиваемых заготовок производится с помощью струбцин, механического или гидравлического пресса. Для изготовления древесной заготовки с двумя клеевыми швами требуется в среднем 0,03...0,05 г клея (площадь склеивания 4...5 см²).

Количество операций прессования для формирования древесного вкладыша подшипника при этом сокращается и определяется уже не размерами заготовки, а целесообразностью использования более громоздкого технологического оборудования.

Так для изготовления подшипников взаимозаменяемых с подшипником качения 210 (диаметр поверхности трения $d = 60$ мм) длина заготовки должна составлять $L = 440$ мм. Формирование за одну операцию деформирования древесных вкладышей для подшипников большего типоразмера нецелесообразно из-за большой металлоемкости оснастки для их изготовления и относительно низкой их востребованности у потребителей. Для 80 % всех узлов трения, где были внедрены подшипники скольжения на основе модифицированной древесины, диаметр поверхностей трения не превышает 60 мм.

Предложенный способ формирования древесной заготовки позволяет использовать древесину консервативной и сбеговой зоны бревна, исключает зависимость геометрических размеров и качества древесной заготовки от расположения доски в раскрое бревна. Кроме того, длина древесной заготовки не зависит от способа раскроя.

Клееные заготовки меньше подвержены короблению и растрескиванию. Они прочны и, при правильной обработке склеиваемых поверхностей и правильном выполнении самой операции склеивания, соединение получается прочнее самой древесины [8, с. 208].

Древесные вкладыши подшипников, изготовленные по этому способу, прошли экспериментальные исследования на возможность реализации процесса деформирования, высокотемпературной пропитки, влагообработки в соответствии с параметрами технологического процесса изготовления подшипников скольжения. Исследовались древесные заготовки длиной 150 и 210 мм с двумя клеевыми швами и длиной 440 мм с четырьмя клеевыми швами для изготовления подшипников скольжения 503, 1206, 210. Эксперименты показали, что клеевые швы не разрушаются при проведении операции деформирования независимо от их количества на древесной заготовке. Шов остается целостным в процессе выполнения операции высокотемпературной пропитки и влагообработки. На предложенный способ формирования древесной заготовки получен патент Республики Беларусь «Способ изготовления крупногабаритных подшипников скольжения» [9].

Вывод. Предложенный способ формирования древесной заготовки для изготовления вкладышей подшипников скольжения позволил усовершенствовать конструкцию подшипника за счет исключения установки нескольких компенсаторов, необходимых при традиционном способе изготовления, уменьшить трудо- и энергоемкость изготовления, сократить производственный цикл, повысить процент использования деловой древесины.

Список использованных источников

1. Хрущов, М.М. Абразивное изнашивание / М.М. Хрущов, М.А. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1976. – 71 с.
2. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учеб. для вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Вышэйшая школа, 1999. – 374 с.
3. Белый, В.А. Древесно-полимерные конструкционные материалы и изделия / В.А. Белый, В.И. Врублевская, Б.И. Купчинов. – Минск: Наука и техника, 1980. – 280 с.
4. Врублевская, В.И. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них / В.И. Врублевская, А.Б. Невзорова, В.Б. Врублевский. – Гомель, 2000. – 324 с.
5. Чубов, Н.И. Модификация прессованной древесины / Н.И. Чубов. – Воронеж: Издательство ВГУ, 1979. – 104 с.
6. Врублевская, В.И. Абразивное изнашивание антифрикционного материала на основе модифицированной древесины березы / В.И. Врублевская, В.В. Макеев // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 5. – С. 535-539.
7. Рушнов, Н.П. Оборудование и технология раскря пиломатериалов / Н.П. Рушнов. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 184 с.
8. Muller, W. Technologie der holzbearbeitung / W. Muller. – Leipzig: Veb Fachbuchverlag, 1989. – 414 p.
9. Способ изготовления крупногабаритного подшипника скольжения: пат. 10474 Респ. Беларусь, МПК F16C17/00 / В.И. Врублевская, А.Б. Невзорова, В.В. Макеев, В.Б. Врублевский; заявитель УО «БелГУТ». – № а20050902; заявл. 16.09.05; опубл. 30.06.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 2 (61). – С. 84-85.

Информация об авторах

Макеев Вячеслав Валерьевич – кандидат технических наук, начальник отдела экологической безопасности и энергосбережения на транспорте испытательного центра железнодорожного транспорта, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: makeyeu@bsut.by. ID ORCID: 0000-0003-4551-1771.

Врублевская Валентина Ивановна – доктор технических наук, профессор, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Information about the authors

Makeev Viacheslav – Ph. D. (Engineering), Head of Department of environmental safety and energy saving in transport of the railway transport test center, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: makeyeu@bsut.by. ID ORCID: 0000-0003-4551-1771.

Vrublevskaya Valentina – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 26.05.2020 г.

УДК 620.22:621.79.01:678.033:678.742

Авдейчик С.В.¹, Струк А.В.¹, Антонов А.С.², Валюк А.Ю.³¹ООО «Молдер», г. Гродно, Беларусь²УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», г. Гродно, Беларусь³ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Аннотация. Разработаны составы нанокomпозиционных материалов на основе регенерированных термопластов класса полиолефинов. Исследованы параметры структуры и деформационно-прочностных характеристик композитов, содержащих дисперсные и жидкофазные модификаторы, которые по параметрам деформационно-прочностных характеристик и морозостойкости превосходят матричные связующие.

Ключевые слова: композиционные материалы, регенерированные полиолефины, модификаторы, металлополимерный ролик, ленточный конвейер.

Avdeychik S.V.¹, Struk A.V.¹, Antonov A.S.², Valiuk A.Ju.³¹LLC "Molder", Grodno, Belarus²Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus³JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus

COMPOSITE MATERIALS BASED ON REGENERATED THERMOPLASTS FOR STRUCTURAL ELEMENTS OF BELT CONVEYORS

Abstract. The nanocomposite materials based on regenerated thermoplastics of the polyolefin class have been developed. The parameters of the structure and stress-strain characteristics of composites containing dispersed and liquid-phase modifiers, which exceed the matrix binders in terms of the stress-strain characteristics and frost resistance, are studied.

Keywords: composite materials, regenerated polyolefins, modifiers, metal-polymer roller, belt conveyor.

Введение. Одним из важнейших конструктивных элементов ленточных конвейеров, в значительной степени определяющим его ресурс и эффективность эксплуатации, являются ролики, выполняющие функцию стабилизатора движения ленты и равномерного распределения нагрузки в процессе технологического функционирования. Эксплуатационные параметры роликов определяются совокупностью материаловедческих и конструкторских решений, учитывающих условия их применения в конкретном производственном процессе.

Перспективным направлением совершенствования роликов ленточных конвейеров является использование конструктивных элементов из композиционных материалов, с максимальной адекватностью учитывающих особенности воздействия физико-химических и нагрузочных факторов на процессы трения, изнашивания и коррозионного повреждения основных комплектующих – обечайки и подшипникового узла [1-3].

Существует большое число конструкций роликов, используемых в ленточных конвейерах с различными параметрами эксплуатационных характеристик. Важным компонентом этих конструкций являются металлополимерные ролики, у которых от-

дельные элементы выполнены из полимерных или композиционных материалов различного состава и технологии получения и переработки. Среди достаточно широкой номенклатуры полимерных и композиционных материалов для изготовления конструктивных элементов металлополимерных роликов особую перспективу имеют термопласты, которые характеризуются сочетанием достаточно высоких параметров деформационно-прочностных характеристик и технологичности переработки в изделия с использованием высокопроизводительного оборудования – экструдеров и термопласт-автоматов [4-7].

Особый интерес представляют термопластичные материалы на основе регенерированных компонентов, так как при использовании современных технологий рециклинга получают промышленные продукты с параметрами деформационно-прочностных и реологических характеристик, близких к первичным, при существенно более низкой стоимости, что повышает эффективность их применения для изготовления металлополимерных конструкций различного функционального назначения, в том числе металлополимерных роликов ленточных конвейеров. Вместе с тем, широкий диапазон использования металлополимерных роликов в конструкциях ленточных конвейеров с различными условиями эксплуатации требует расширения марочного ассортимента полимерных и композиционных материалов на основе термопластов для обеспечения оптимальных технических и экономических параметров.

Цель настоящей работы состояла в исследовании параметров структуры и деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе регенерированных полиолефинов.

Методика исследований. Для исследований были выбраны регенерированные термопласты класса полиолефинов – полипропилен (ПП), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), которые промышленно производят на ОАО «Белворполимер» (РБ) и предприятии «Timas» (Республика Польша (РП)) с использованием экструзионных технологий рециклинга амортизированных изделий различного вида. Основным видом полуфабриката для рециклинга являлась упаковочная тара для хранения и транспортирования сыпучих грузов, которую изготавливают из плоских одноосно ориентированных волокон. Такому полуфабрикату свойственны более высокие значения параметров деформационно-прочностных характеристик по сравнению с неориентированными продуктами в виде гранул, волокон, пленок аналогичного состава.

Базовые регенераты использовали в виде гранул стандартного размера, полученных методом экструзии. Для модифицирования материалов использовали регенераты эластомера марки Эласт SEBS (РП), полиэтилена высокого давления (ПЭВД) (РБ), сульфата кальция (мела) в виде гранулированного концентрата на основе ПЭВД, минеральное масло гидравлическое (РБ). Для получения композиционных материалов использовали смеситель, который осуществлял механическое совмещение компонентов с высокой степенью гомогенности в диапазоне температур 293 ± 5 К. Образцы для проведения исследований изготавливали на специализированной оснастке методом литья под давлением с соблюдением рекомендаций ГОСТ 4647-80.

Сравнительный анализ параметров деформационно-прочностных и структурных характеристик композиционных материалов проводили с использованием данных, полученных при применении двухшнекового смесителя MPC 67/2 фирмы «Comrex».

Параметры деформационно-прочностных характеристик в соответствии с ГОСТ 4647-80 оценивали на стандартных образцах с использованием маятникового копра ЛСВ-1,5 и установки ИР 5047-50-11 при скорости растяжения 2,0 мм/мин.

Теплофизические характеристики базовых термопластов и композиций на их основе исследовали методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на дери-

ватографе TGA/SDTA фирмы «Mettler Toledo» при скорости нагрева 5 град./мин на навесках близкой массы.

Результаты и обсуждение. Результаты ДТА базового регенерированного ПП различного производства (рисунки 1 и 2) указывают на наличие в продукте примесей ПЭНД с температурой плавления в диапазоне 121-126 °С и основной фракции с температурой плавления 162-167 °С при различной устойчивости продуктов к термоокислительной деструкции.

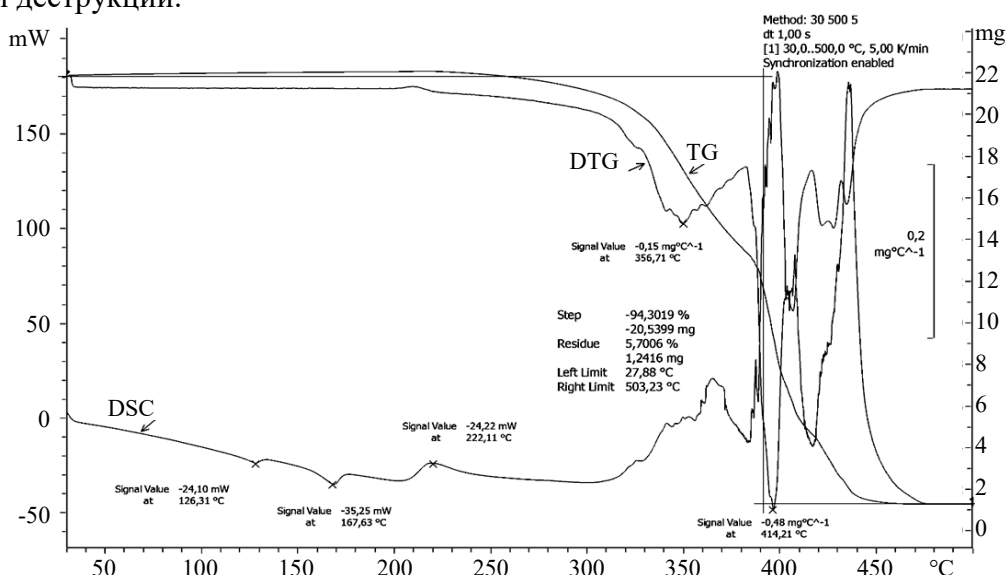


Рисунок 1. – Кривые ДТА базового регенерированного ПП (ПИ)

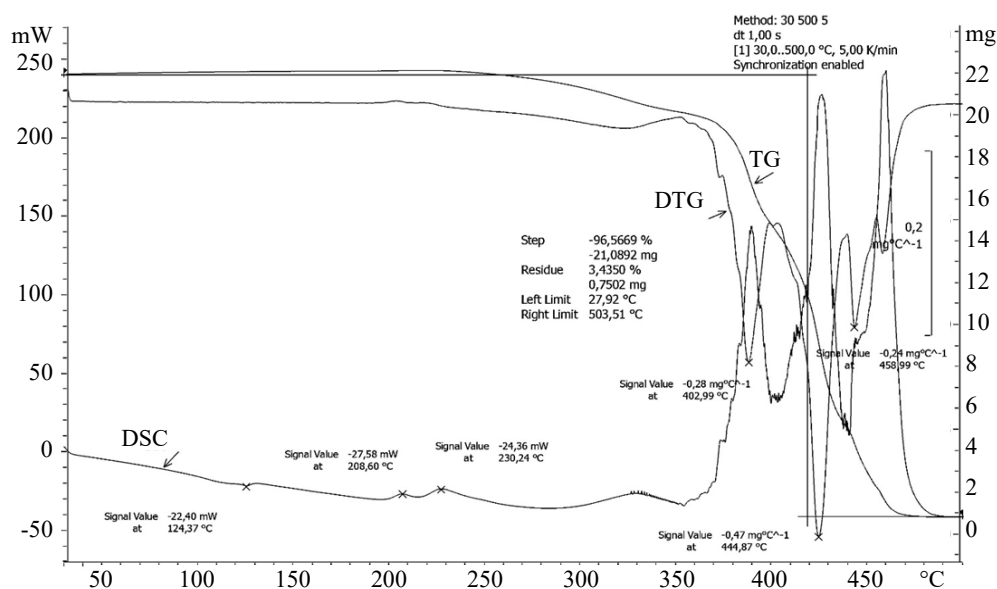


Рисунок 2. – Кривые ДТА базового регенерированного ПП (РБ)

Наличие примесных продуктов обуславливает заметную нестабильность параметров деформационно-прочностных характеристик гранулята различных партий по показателям ударной вязкости физического предела текучести σ_T , деформации при физическом пределе текучести Δl_T , прочности при максимальном усилии σ_{max} и деформации при максимальном усилии Δl_{max} . Так, показатель ударной вязкости в зависимости от партии характеризуется разбросом значений от 30 до 50 Дж/м при наличии

образцов, которые не разрушаются при проведении испытаний с использованием маятника массой 1,5 кг (15 Н). Диапазон значений параметра σ_T составляет 20,075-20,825 МПа, σ_{\max} – 18,225-20,825 МПа. При этом, диапазон значений Δl_T составляет 6,97-10,37 %, а Δl_{\max} – 5,51-10,22 %.

Полученные результаты испытаний 15 партий регенерата ПП (РП) указывают на достаточную для практических применений стабильность значений основных параметров, характеризующих качество продукта при необходимости использования методов увеличения их для обеспечения стабильных параметров изделий из него. Для модельных образцов из регенерированного полипропилена производства ОАО «Белвторполимер» значения базовых параметров σ_T , σ_{\max} на 10-15 % ниже при большем разбросе значений по партиям. Особое значение имеет этот аспект для изделий, монтаж или эксплуатация которых предполагает воздействие ударных нагрузок при широком диапазоне температур окружающей среды. Такие особенности характерны, в том числе, для металлополимерных роликов ленточных конвейеров, применяемых для транспортирования сыпучих продуктов в технологическом производстве на предприятиях горнодобывающей промышленности, строительной индустрии, дорожного строительства.

Для регулирования параметров деформационно-прочностных характеристик матричного регенерированного ПП были использованы различные компоненты, которые вводили механическим перемешиванием с использованием дробильно-моечного комплекса переработки отходов пленки ПЭ и мягких контейнеров (биг-бег) для получения вторичных полиолефинов, производитель «Sorema, div. of Previerio N. s.r.l.» (Италия) и экструзионной линии для гранулирования отходов пластмасс EREMA 1514 TV Epluseco SAVE, производитель «EREMA Engineering Recycling Maschinenund Anlagen Ges. m.b.H.» (Австрия) (таблица).

Таблица. – Составы материалов для изготовления образцов

Компонент	Содержание в % в композициях										
	I	XVI	XVII	XVIII	XIX	XX	XXI	XXII	XXIII	XXIV	XXV
ПП регенерированный (РП)	100	95	90	93	86	85	73	88	83	78	78
Концентрат сульфата кальция (мел) на основе ПЭВД	–	–	–	5	10	–	10	–	5	10	5
Минеральное масло	–	5	10	2	4	–	2	2	2	2	2
Эластомер	–	–	–	–	–	15	15	10	10	10	15

Введение в состав матрицы жидкофазного модификатора (масла минерального) в количестве 5-10 мас. % приводит к существенному уменьшению параметров σ_T , σ_{\max} при одновременном увеличении деформативности, оцениваемой по параметрам Δl_T и Δl_{\max} . Так, значение параметров σ_T и σ_{\max} уменьшилось с 20,45 МПа до 17,95 МПа, параметров Δl_T и Δl_{\max} увеличилось от 8,99 % до 12,82 % при введении 5 мас. % минерального масла (рисунок 3). При модифицировании регенерата 10 мас. % жидкофазного пластификатора эффект проявляется в большей мере. Значительное снижение значений параметров σ_T и σ_{\max} препятствует использованию пластифицированных композитов для изготовления функциональных изделий, к которым предъявляют повышенные требования к конструкционной жесткости.

Модифицирование матрицы ПП, пластифицированной минеральным маслом, сульфатом кальция в виде концентрата на основе полиолефинов в количестве 5-10 мас. %

позволяет достичь технически значимого результата, состоящего в сохранении достаточно высоких значений параметров σ_T и σ_{max} (15,325-16,475 МПа) при значительном увеличении параметров, характеризующих пластичность – Δl_T и Δl_{max} , с 8,90-8,99 до 14,79-15,01 % (рисунок 3). Характерным признаком таких композиций является значительное увеличение параметра ударной вязкости образцов по Изоду – при действующей массе маятника 1,5 кг (15 Н) они сохраняют целостность при серии не менее 10 образцов.

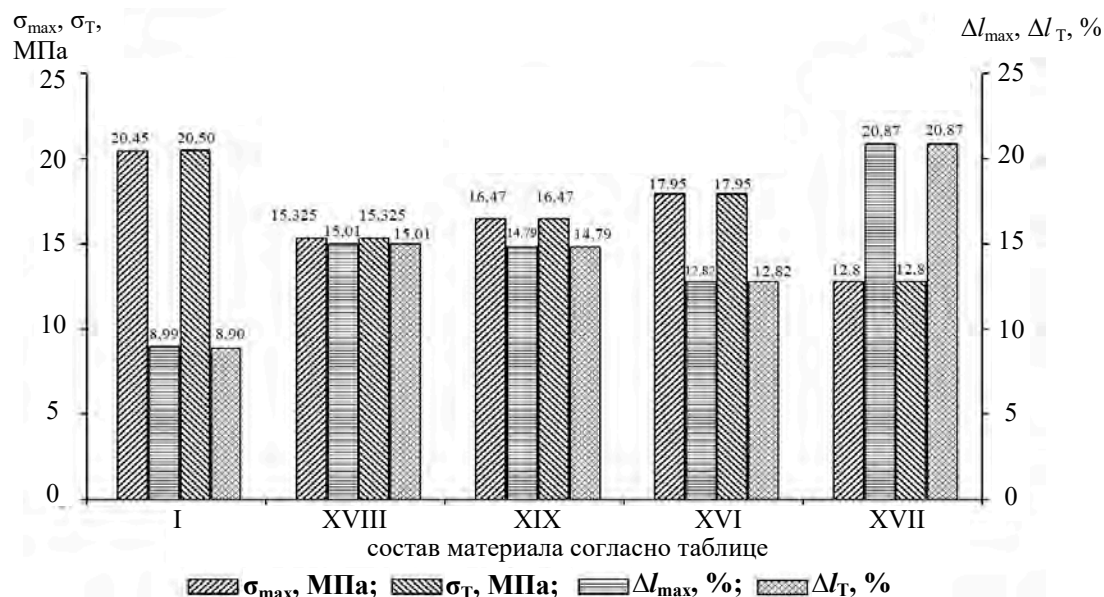


Рисунок 3. – Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе смесей регенерированного ПП (РП), ПЭ и сульфата кальция

Необходимо отметить, что модификатор $CaSO_4$ вводят в виде гранулированного концентрата на основе полиолефина (ПЭНД, ПЭВД), что приводит к образованию смеси из полиолефинов, близких по молекулярному строению и массе. Такие компоненты обладают повышенной термодинамической совместимостью, что способствует формированию совмещенного композита с высоким уровнем гомогенности вследствие взаимной растворимости в вязкотекучем состоянии.

Близкий по достигаемым параметрам эффект реализуется при модифицировании матричного регенерированного ПП регенератом эластомера в количестве 5-15 мас. %. При содержании модификатора 15 мас. % при некотором снижении значений параметров прочности σ_T и σ_{max} (с 20,45-20,50 до 15,525 МПа) заметно увеличивается деформативность, оцениваемая по значениям Δl_T и Δl_{max} (с 8,90-8,99 до 12,13 %) (рисунок 4). При этом образцы сохраняют свою монолитность при ударном воздействии на маятниковом копре. Дополнительное введение в состав композиции жидкофазного модификатора способствует снижению показателей прочностных характеристик σ_T и σ_{max} (с 20,45-20,50 до 14,975 МПа) при повышенной ударной вязкости.

Такие композиции могут быть использованы для изготовления изделий, эксплуатируемых при воздействии ударных нагрузок. При этом жидкофазный пластификатор способствует увеличению подвижности макромолекул матричного ПП и эластомера в вязкотекучем состоянии, что способствует повышению термодинамической совместимости этих компонентов и получению более гомогенной смеси в процессе литья под давлением. Композиции этого типа более предпочтительны в практическом применении по сравнению с композитами на основе смеси ПП – эластомер.

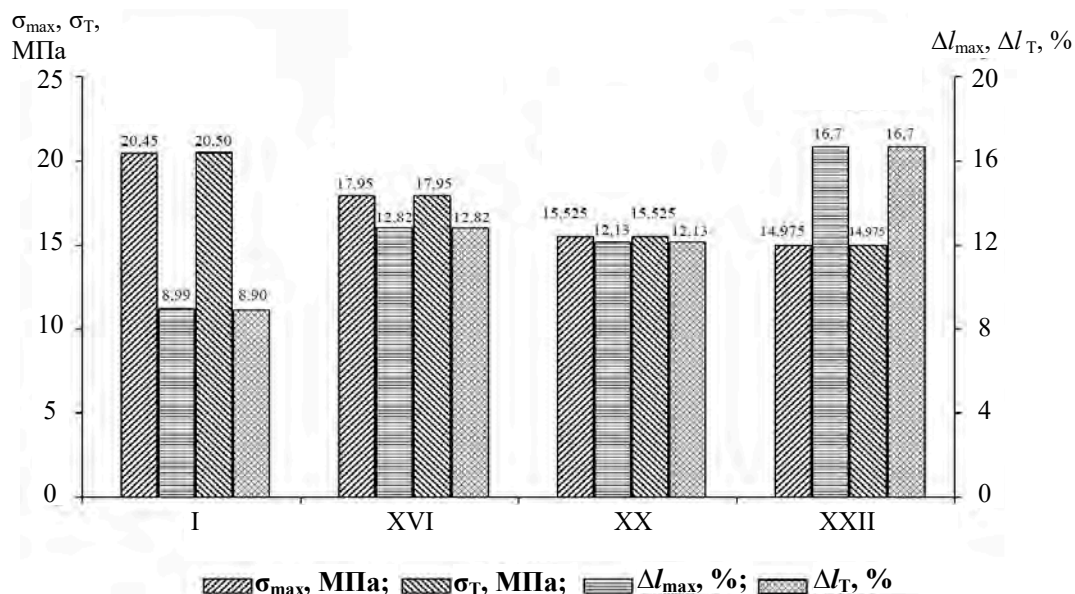


Рисунок 4. – Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе смесей регенерированного ПП (РП) и эластомера

Введение минерального масла в состав композиции не создает технологических препятствий ни при получении композита, ни при его переработке. Пластифицирование матричного регенерированного ПП минеральным маслом более предпочтительно по сравнению с введением эластомерной составляющей с точки зрения экономической эффективности и доступности сырья.

В качестве жидкофазного компонента-пластификатора возможно использование амортизированных продуктов, образующихся в процессе эксплуатации автотракторной техники, технологического оборудования, используемого в металлообработке и производстве изделий методом литья под давлением и экструзии. Наличие в таких продуктах функциональных присадок (антиоксидантов, наноразмерных модификаторов, стабилизаторов реологических характеристик и др.) благоприятно сказывается на стойкости композитов к воздействию эксплуатационных факторов, прежде всего, температурных.

Пластифицирование матричного ПП жидкофазным компонентом способствует диспергированию эластомерного модификатора, увеличивая однородность двухфазной системы.

Известно, что смесевые композиты, полученные методом термомеханического совмещения компонентов, характеризуются выраженной фазовой неоднородностью вследствие термодинамической несовместимости, препятствующей взаимодиффузии макромолекул матрицы и модификатора. Для композитов типа «термопласт – термопласт» (ПА 6 – СФД, ПА 6 – ПЭНД, ПЭНД – АБС, ПЭНД – СФД), термоэластопласт (ТЭП) – термопласт (ТПУ – СФД, МПЭУ – СФД, ПА 6 – ДСТ-30) характерным признаком структуры является наличие в матрице агрегатов легирующей фазы различной дисперсности и геометрических параметров. При этом в смесевых композитах легирующая фаза термопласта имеет форму, преимущественно близкую к глобулярной или цилиндрической, легирующая фаза ТЭП или эластомера представляет собой образование произвольного габитуса [8].

Подобные структурные признаки характерны и для композитов на основе регенерированного и первичного ПП и эластомера. Эластомерный модификатор имеет форму частиц неопределенной формы, располагающихся с градиентом по сечению об-

разца – наружные слои имеют более низкое содержание модификатора по сравнению с центральными.

Считают, что такой эффект обусловлен различием параметров реологических характеристик матричного и модифицирующего компонентов при температурах переработки литьем под давлением или экструзии. Под действием сдвиговых напряжений компонент с более низкой вязкостью расплава преимущественно формирует поверхностный слой изделия (образца), создавая предпосылки образования градиентной структуры. Этот аспект имеет особое значение при изготовлении тонкостенных изделий, у которых поверхностный слой составляет от 30 до 50 % сечения. Поэтому в ряде случаев, модифицирующий компонент сосредотачивается преимущественно в центральной части изделия (образца), и при увеличении его содержания эффект модифицирования менее значим при использовании технологии литья или экструзии по сравнению с технологиями прессования или осаждения порошкообразной смеси на подложку с оплавлением.

Совместное модифицирование пластифицированной матрицы регенерированного ПП эластомерным компонентом в количестве 5-15 мас. % и сульфатом кальция (мелом) в количестве 5-10 мас. % (рисунок 5) позволяет сохранить достаточно высокий уровень параметров прочностных характеристик (σ_T , σ_{max} на уровне 13,55-14,90 МПа) при повышении деформативности, оцениваемой по значениям параметров Δl_T и Δl_{max} (диапазон 14,20-17,72 МПа) по сравнению с исходным полипропиленом (диапазон 8,90-8,99 %), композитом «ПП + эластомер» (12,13 %), композитом «ПП пластифицированный – эластомер» (14,63 %). При этом устойчивость композитов к воздействию концентрированных ударных нагрузок существенно превосходит этот параметр для исходного матричного ПП.

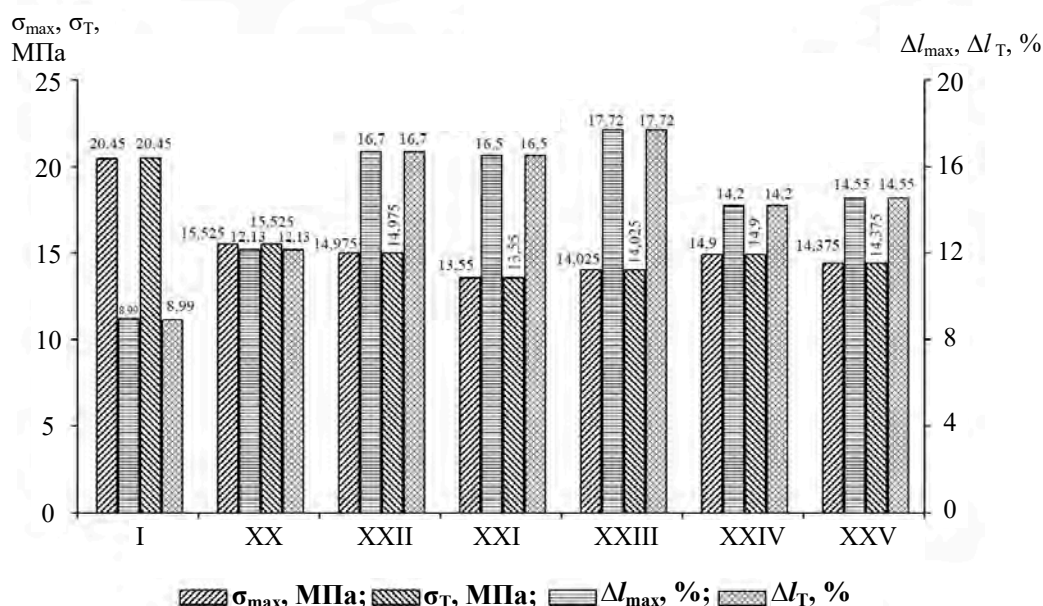


Рисунок 5. – Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе смесей регенерированного ПП (РП), эластомера и $CaSO_4$

Совместное модифицирование матричного ПП эластомерным компонентом, высокодисперсным неорганическим компонентом и жидкофазным пластификатором способствует формированию макрогетерогенной структуры с высокой гомогенностью.

Реализуется принцип многоуровневого модифицирования, предложенный нами ранее в ряде работ [9, 10].

Жидкофазный пластификатор способствует увеличению подвижности макромолекул при температурах вязкотекучего состояния; высокодисперсные частицы сульфата кальция (мела) способствуют формированию надмолекулярной структуры матричного полимера и модификатора. При этом введение этих частиц в состав композита в виде концентрата на основе полиолефинов приводит к увеличению доли компонента с близким к ПП молекулярным строением и термодинамически с ним совместимого, вследствие чего формируются надмолекулярные структуры с зародышами в виде неорганических частиц, образованные смесью макромолекул. Это обстоятельство приводит к изменению параметров характеристик матричного ПП регенерированного.

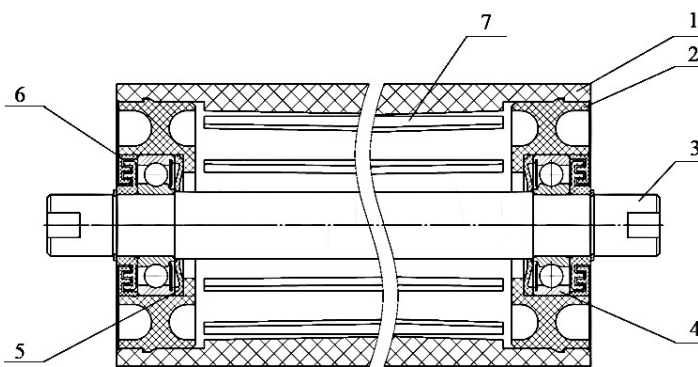
Введение в состав композита эластомерного (или термоэластопластичного) компонента приводит к образованию его самостоятельной фазы, гомогенность распределения которой зависит от условий совмещения и используемого оборудования. Наличие такой фазы с высокой устойчивостью к ударным воздействиям и знакопеременному деформированию способствует значительному увеличению параметра удельной ударной вязкости изделий (образцов), вследствие реализации эффекта рассеивания подводимой энергии макромолекулами модификатора, обладающими способностью к передеформированию и конфигурационному трансформированию без разрушения. Этот эффект свойственен для композитов на основе термопластов, содержащих эластомерные и термоэластопластичные модификаторы, полученных по различным технологиям, в том числе по технологии термомеханического совмещения. Пластифицирование матричного компонента термодинамически совместимым жидкофазным ингредиентом способствует не только, как отмечено ранее, увеличению пластичности композиции, но и снижению температуры стеклования, которая определяет температурный диапазон применения изделий из композитов на основе ПП. ПП первичный и регенерированный обладает низкой стойкостью к воздействию отрицательных температур окружающей (эксплуатационной) среды, что существенно сужает диапазон применения изделий, несмотря на достаточно высокие параметры деформационно-прочностных характеристик, технологичность переработки в изделия и их рециклинга, распространенность и широкий марочный ассортимент, а также невысокую стоимость и доступность на отечественном рынке, рынке стран СНГ и ЕС.

Создание на базе принципа многоуровневого модифицирования композиционных материалов на основе регенерированного ПП позволяет расширить марочный ассортимент конструктивных композитов для изготовления компонентов металлополимерных систем различного функционального назначения.

Проведенные исследования позволили разработать новые подходы к созданию композиционных материалов на основе регенерированного ПП для изготовления конструктивных элементов металлополимерных роликов ленточных конвейеров – корпуса ролика, корпуса подшипника, пыльников, лабиринтов [11, 12]. Один из вариантов конструкции такого ролика представлен на рисунке 6.

В предложенной конструкции армирующие ребра 7, неразъемно соединенные с внутренней поверхностью обечайки 1, увеличивают нагрузочную способность металлополимерного ролика при сохранении всех преимуществ, обусловленных наличием других конструктивных элементов (2, 5, 6), изготовленных из полимерных или композиционных материалов [11, 12].

В зависимости от параметров эксплуатационных характеристик ленточного конвейера осуществляют выбор состава композиционного материала и технологии изготовления элементов конструкции. Корпус ролика изготавливают методом литья под



1 – обечайка; 2 – корпус подшипника; 3 – ось;
4 – шарикоподшипник; 5 – пыльник;
6 – лабиринтное уплотнение; 7 – армирующие ребра
Рисунок 6. – Вариант конструктивного исполнения
металлополимерного ролика ленточного конвейера

давлением или экструзии с последующей механической обработкой. Последний вариант технологии имеет предпочтение в случае конструкции ролика металлополимерного для ленточных конвейеров с относительно невысокими нагрузочно-скоростными режимами эксплуатации. Для более нагруженных конвейеров используют металлополимерные ролики, в которых обечайка с армирующими ребрами изготовлена из композиционного материала методом литья под давлением.

Апробирование опытно-промышленной партии роликов металлополимерных в ленточных конвейерах, применяемых в технологических процессах добычи и переработки минерального сырья на предприятиях ОАО «Беларуськалий», показало, что они являются полноценной альтернативой аналогам, имеют повышенную стойкость к воздействию эксплуатационных абразивных и коррозионных сред и более низкие ценовые параметры.

Исследования выполнены в рамках программы научно-технического сотрудничества по договору № Т19УЗБГ-003 от 21.06.2019 г.

Выводы.

1. Для изготовления конструктивных элементов роликов ленточных конвейеров – корпуса ролика, корпуса подшипника, пыльников и лабиринтов – целесообразно использовать композиционные материалы на основе регенерированных термопластов класса полиамидов, полиолефинов, содержащие функциональные компоненты, обеспечивающие заданные параметры деформационно-прочностных, триботехнических и теплофизических характеристик.

2. Для изготовления корпуса ролика металлополимерного для ленточных конвейеров малой и средней нагруженности эффективно использование композиционных материалов на основе регенерированного полипропилена отечественного или импортного производства. Для обеспечения заданных параметров деформационно-прочностных, триботехнических характеристик и морозостойкости в матричный регенерат необходимо вводить жидкофазные пластификаторы и функциональные компоненты, обеспечивающие реализацию принципа многоуровневого модифицирования.

3. Разработаны составы наноконпозиционных материалов на основе регенерированных термопластов класса полиолефинов (ПП, ПЭНД) отечественного (ОАО «Белвторполимер») и импортного производства (Timas, РП), содержащие низко-размерные твердофазные модификаторы, высокомолекулярные компоненты (ТЭП) и жидкофазные пластификаторы, которые по параметрам деформационно-прочностных характеристик (σ_T , σ_{max}) находятся в диапазоне 14,0-18,0 МПа при ударной вязкости, значительно превосходящей матричные связующие. Разработанные материалы могут быть использованы для изготовления элементов конструкции металлополимерных роликов ленточных конвейеров, применяемых в различных отраслях промышленного производства.

Список использованных источников

1. Спиваковский, А.О. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов / А.О. Спиваковский, В.К. Дьячков. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.
2. Ленточные конвейеры горной промышленности: исследования и проектирование: монография / Ю.Н. Захаров [и др.]; под науч. ред. Ю.Н. Захарова. – Гродно: ГрГУ им. Я. Купалы, 2012. – 546 с.
3. 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.
4. Мэнсон, Дж. Полимерные смеси и композиты / Дж. Мэнсон, Л. Сперлинг; пер. с англ. А.П. Коробко, А.В. Вакулы; под ред. Ю.К. Годовского. – М.: Химия, 1979. – 440 с.
5. Полимерные смеси: в 2 т. / под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла; пер. с англ. под ред. В.К. Кулезнева. – СПб.: Науч. основы и технологии, 2009. – Т. 1: Систематика / В. Арриги [и др.]. – 616 с.
6. Полимерные смеси: в 2 т. / под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла; пер. с англ. под ред. В.К. Кулезнева. – СПб.: Науч. основы и технологии, 2009. – Т. 2: Функциональные свойства / С. Абду-Сабет [и др.]. – 605 с.
7. Струк, В.А. Конструкционные материалы на основе технологических отходов / В.А. Струк, А.Ф. Мануленко, Г.Г. Коляго. – Минск: Белорус. науч.-исслед. ин-т науч.-техн. информ. и техн.-экон. исслед., 1987. – 40 с.
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. Кравченко, В.И. Карданные передачи: конструкции, материалы, применение / В.И. Кравченко, Г.А. Костюкович, В.А. Струк; под ред. В.А. Струка. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 410 с.
10. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.А. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
11. Ролик конвейерный: пат. 17683 Респ. Беларусь, МПК В65G39/00 / Д.В. Дьяков, И.А. Конопляник, Д.Н. Довнар; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № а20110188; заявл. 15.02.12; опубл. 30.10.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 5.
12. Ролик ленточного конвейера: пат. 11121 Респ. Беларусь, МПК В65G39/09 / А.Н. Бурцев, В.Я. Щерба, В.Н. Довнар, Е.В. Щерба; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № u20160009; заявл. 15.01.16; опубл. 30.08.16 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 4.

Перечень принятых обозначений и сокращений

- ПП – полипропилен;
ПЭНД – полиэтилен низкого давления;
ПЭВД – полиэтилен высокого давления;
ДТА – дифференциальный термический анализ;
 σ_T – физический предел текучести, МПа;

Δl_T – деформация при физическом пределе текучести, %;
 σ_{\max} – прочность при максимальном усилии, МПа;
 Δl_{\max} – деформация при максимальном усилии, %;
ТЭП – термоэластопласт;
ПА – полиамид;
СФД – сополимер формальдегида с диоксаланом;
АБС – акрилонитрилбутадиенстирол;
ДСТ – дивинилстирольный термоэластопласт;
ТПУ – термопластичный полиуретан;
МПЭУ – микрочаеистый полиэфируретан.

Информация об авторах

Авдейчик Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер ООО «Молдер» (Скидельское шоссе, 18-1, 230003, г. Гродно, Беларусь), e-mail: info@molder.by.

Струк Александр Васильевич – магистр юридических наук, начальник лаборатории ООО «Молдер» (Скидельское шоссе, 18-1, 230003, г. Гродно, Беларусь), e-mail: proffi2011@yandex.ru.

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.

Валюк Антон Юрьевич – магистрант УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», мастер лаборатории композиционных материалов, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: ipr@sipr.by.

Information about the authors

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.

Struk Alexander Vasilevich – Master of Laws, Head of the Laboratory at Molder LLC (18-1, Skidel'skoe shosse, 230003, Grodno, Belarus), e-mail: proffi2011@yandex.ru.

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.

Valiuk Anton Jurievich – Master student, Yanka Kupala State University of Grodno, Master of the Laboratory of composite materials, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

УДК 648.7:661.842'062.2-022.532-042.3(045)

Лашкина Е.В.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
ИНСЕКТИЦИДНОЙ ПЛЕНКИ**

Аннотация. Разработан способ получения многофункциональных нанокмпозиционных материалов на основе полиэтилена высокого давления путем модифицирования полимерной матрицы химически активными реагентами (инсектицидами из классов синтетических пиретроидов, фосфорорганических соединений, неоникатиноидов, наноразмерными частицами карбоната кальция и УФ-стабилизатором Tinuvin 783), оптимизированные по рецептурным, структурным, физическим и физико-химическим параметрам и биоактивности. Установлено, что молекулы инсектицида, иммобилизованные в рыхлой структуре частиц карбоната кальция, сохраняют свою подвижность и способность к испарению, обеспечивая пролонгированное действие пленки.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, наноразмерные частицы карбоната кальция, стерически-затрудненные амины, инсектициды, инсектицидная активность.

Lashkina E.V.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***INFLUENCE OF NANOSIZED PARTICLES OF CALCIUM CARBONATE ON THE
STRUCTURE AND PROPERTIES OF MULTIFUNCTIONAL INSECTICIDAL FILM**

Abstract. A method has been developed for producing multifunctional nanocomposite materials based on high-pressure polyethylene by modifying the polymer matrix with chemically active reagents (insecticides from the classes of synthetic pyrethroids, organophosphorus compounds, neonicotinoids, nanosized calcium carbonate particles and Tinuvin 783 UV stabilizer), optimized by prescription, structural, physical and physico-chemical parameters and bioactivity. It was established that insecticide molecules immobilized in the loose structure of calcium carbonate particles retain their mobility and ability to evaporate, providing a prolonged action of the film.

Keywords: polymer composites, nanosized particles of calcium carbonate, sterically-hindered amines, insecticides, insecticidal activity.

Введение. В настоящее время перспективным направлением в полимерном материаловедении является разработка многофункциональных полимерных нанокмпозитивов с заданным комплексом свойств.

Традиционным способом достижения необходимых эксплуатационных свойств композиций на основе полиолефинов является подбор компонентов композиций и их оптимальных соотношений. Важной задачей таких систем является исследование термодинамической и технологической совместимости базового полимера и модифицирующих добавок. Специфические добавки образуют свою собственную фазу в полимерной матрице, превращая полимерную композицию в гетерофазную систему. Однако, при введении небольших количеств модифицирующих веществ в полимерные композиции свойства последних в значительной мере определяются характеристиками добавок [1].

Введение функциональных добавок в полимерную матрицу позволяет создать новые материалы с особыми свойствами [2] (высокой прочностью, бактерицидностью, фунгицидностью, инсектицидностью, стойкостью к термоокислительной деструкции и действию УФ-облучения и т.д.), что обеспечивает их высокоэффективное использование в различных отраслях промышленности.

Одной из современных тенденций в области разработки способов защиты сельскохозяйственных, лесных угодий и декоративных насаждений в городах от насекомых-фитофагов, а также сырья и промышленных товаров от биоповреждений является их упаковка и/или укутывание с помощью многофункциональных инсектицидных полимерных пленок [3].

Технология борьбы с насекомыми-кератофагами (платяной, шубной, меховой, войлочной и ковровой молью, а также жуком-кожеедом) с помощью инсектицидных препаратов традиционно используется в текстильной промышленности. Инсектицидное средство на основе четвертичной аммониевой соли наносят в виде покрытий на ткани, меха и изделия из них [4]. Такой препарат получил ограниченное применение из-за технологической сложности и ухудшения качества изделий.

Необходимость создания в стране производства многофункциональной упаковочной инсектицидной полимерной пленки обусловлена отсутствием аналогичных отечественных материалов и возросшей потребностью в них промышленных предприятий, выпускающих непродовольственные товары (шерстяные ткани, одежду, пушно-меховые полуфабрикаты и изделия, утепления для обуви, мебели и т.п.), для решения проблемы защиты сырья от биоповреждений, вызываемых насекомыми-вредителями.

Огромный опыт применения инсектицидов накоплен в сельском хозяйстве. Самодиспергирующийся инсектицидный и инсектоакарицидный препарат [5] представляет собой суспензию, содержащую синтетический пиретроид, стабилизатор, поверхностно-активное и клеящее вещество. Известна инсектицидная композиция с замедленным высвобождением активного вещества [6], содержащая летучий пиретроидный инсектицид, смешанный с раствором полимера.

Совершенствование системы защиты насаждений от энтомофитов на основе применения высокоэффективных методов, средств и технологий положительно скажется на экологическом и ресурсном потенциале сельскохозяйственных угодий и лесов, будет способствовать сохранению природного комплекса и улучшению экологической обстановки в Республике Беларусь.

Современные инсектициды принадлежат к достаточно разнообразным классам химических веществ. Это инсектициды на основе неоникотиноидов, синтетических пиретроидов, фосфорорганических соединений, обладающие высокой инсектицидной активностью, продолжительным защитным действием при низких нормах расхода (1-5 %), эксплуатационными характеристиками ($T_{\text{разл.}} = 180-230 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{кип.}} = 120-286 \text{ }^\circ\text{C}$), удовлетворяющими температуре переработки полимерной матрицы, экологической безопасностью по отношению к окружающей среде [7].

Высокоэффективным классом стабилизаторов, повышающих стойкость полиэтиленового связующего к термоокислительной деструкции и действию УФ-облучения являются стерически (пространственно) затрудненные амины (ПЗА) [8].

Перспективным компонентом для равномерного распределения малых количеств инсектицида и стабилизатора в перерабатываемой композиции и устранения слипания готовой к эксплуатации пленки является нанопорошок карбонат кальция (CaCO_3) с размером частиц менее 100 нм.

Целью работы является изучение влияния наноразмерных частиц минерального наполнителя карбоната кальция на физико-химические и эксплуатационные свойства инсектицидной полимерной пленки.

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).

Потенциально активными компонентами в полимерных пленочных нанокompозитах выступали инсектициды различного спектра действия, разрешенные к применению на территории Республики Беларусь и стран СНГ. Их основные характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные характеристики используемых инсектицидов

Класс инсектицида	Действующее вещество	Название (торговая марка), брутто-формула	Химическая формула	ТУ	Номер гос. рег.
Синтетические пиретроиды	Перметрин (П)	«Искра», КЭ (IRS)-цис, транс-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметилциклопропанкарбоновой кислоты 3-феноксibenзиловый эфир	$C_{21}H_{20}Cl_2O_3$	113-04-331-91	01-0019
	Циперметрин (ЦП)	«Шарпей», МЭ (IRS)-цис, транс-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметилциклопропанкарбоновой кислоты (RS)-3-фенокси- α -цианобензиловый эфир	$C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$	2387-015-45418518-99	01-0099
	β -циперметрин (β -ЦП)	«Кинмикс», КЭ α -циано-3-феноксibenзол-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметилциклопропанкарбоксилат	$C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$	2441-061-48811647-2006	01-0025
Фосфорорганический инсектицид	Пиримифосметил (ПМ)	«Актеллик», КЭ 2-диэтиламино-6-метилпиримидин-4-ил диметилфосфат	$C_{11}H_{20}N_3O_3PS$	2387-007-00494172-97	01-0027
Неоникотиноид	Имидаклоприд (ИМ)	«Искра Золотая», ВРК 4,5-дигидро-N-нитро-1-[(6-хлор-3-пиридил)метил]имидазолидин-2-иленамин	$C_9H_{10}Cl_5NO_2$	2387-087-42315284-04	01-0110

В композициях использовали свето- и термостабилизатор из класса пространственно-затрудненных аминов Tinuvin 783 (CIBA, Швейцария), повышающий стойкость полиэтиленового связующего к термоокислительной деструкции [9].

Средством равномерного распределения целевых добавок инсектицида и стабилизатора в связующем выступил нанопорошок $CaCO_3$, дисперсностью менее 100 нм (ГОСТ Р 56549-2015).

В качестве пластификатора был выбран диоктилфталат (ДОФ), ТУ 6-09-08-1504-83.

Композиции с содержанием модифицирующих реагентов готовили следующим образом: в нанопорошок $CaCO_3$ (до 5 мас. %) последовательно путем смешивания вводили инсектицид (1-2 мас. %), затем стабилизатор (0,5-1 мас. %); смесь пластифициро-

вали жидким ДОФ (2-3 мас. %). Полученную массу смешивали с ПЭВД (90-92 мас. %). Пленки формовали из гранулята методом рукавной экструзии.

Технологичность процесса переработки композиций в пленку оценивали с помощью экструзионного агрегата НААКЕ RHEOCORD 90 по критерию минимума крутящего момента в шнеке. В соответствии с этим критерием определен диапазон оптимальной дисперсности частиц CaCO_3 менее 100 нм.

Деформационно-прочностные характеристики пленок (разрушающее напряжение 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 личинок комнатных мух (*Musca domestica*). Личинки (по 50 особей) помещали в бюксы на образцы исследуемых пленок. Спустя 5 ч регистрировали число (m) погибших личинок.

Физико-химические, фазовые и структурные изменения материалов исследовали с помощью дифференциально-термического и термогравиметрического анализа. Морфологию поверхности исследуемых пленочных образцов ПЭВД/ДОФ/инсектицид/Tinuvin 783/ CaCO_3 оценивали методом растровой электронной микроскопии с помощью оптического микроскопа Device.

С целью определения термической стабильности полученных композиций был проведен дифференциально-термический анализ (ДТА).

ИК-спектры образцов исследуемых материалов регистрировали в диапазоне волновых чисел $4000\text{-}400\text{ см}^{-1}$ на ИК-Фурье спектрофотометре NICOLET 5700. Идентификацию и анализ полученных спектров осуществляли с использованием имеющихся данных по ИК-спектрам полимеров, неорганических и органических соединений [10].

Оптическую плотность характеристических полос поглощения в ИК-спектрах определяли по формуле:

$$D = \lg(I/I_0),$$

где D – оптическая плотность полосы поглощения;

I – интенсивность пропущенного (поглощенного) излучения на исследуемой частоте;

I_0 – интенсивность падающего излучения (фон).

Интенсивности полос, необходимые для расчета D , определяли по методу базовой линии [11].

Микробиологическую активность модифицированных пленок исследовали на тест-культурах бактерий *Pseudomonas aeruginosa*, выращенных из паспортизированных штаммов Института микробиологии НАН Беларуси. Культуры микроорганизмов высевали в чашки Петри с мясопептонной питательной средой. В каждую чашку помещали по 3 образца пленок одинакового инсектицидного состава. Площадь образцов 10 мм^2 , масса = 0,07 г, чашки с образцами выдерживали в термостате при температуре $28\text{ }^\circ\text{C}$ и влажности, близкой к 100 %, в течение 7 суток. Регистрировали появление зоны задержки роста микроорганизмов.

Результаты и их обсуждение. По данным деформационно-прочностных показателей область оптимальных концентраций CaCO_3 составляет 4-5 мас. % (таблица 2). Дальнейшее увеличение содержания наночастиц CaCO_3 приводит к снижению этих показателей, что обусловлено уменьшением содержания ПЭВД и повышением дефектно-

сти материала, влияющей на изменение его структуры и, соответственно, снижение деформационных характеристик и эксплуатационных свойств.

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

№ образцов	Компоненты и их содержание, мас. %									Деформационно-прочностные характеристики σ (МПа)/ ϵ (%) после облучения в течение месяца			
	ПЭВД	CaCO ₃	инсектициды					ДОФ	Tinuvin 783	месяц			
			П	ЦП	β -ЦП	ПМ	ИМ			0	1	2	3
1	89	6	1	-	-	-	-	3	1	8,82/180	8,63/177	8,45/170	8,01/160
2	90	5	2	-	-	-	-	2	1	9,80/170	9,52/170	9,27/165	9,15/165
3	91	4	2	-	-	-	-	2	1	9,83/170	9,53/170	9,33/170	9,31/165
4	92	4	1	-	-	-	-	2	1	9,84/170	9,61/170	9,39/165	9,33/160
5	92,5	4	1	-	-	-	-	2	0,5	9,85/170	9,16/160	8,77/150	8,47/140
6	92	3	2	-	-	-	-	2	1	8,88/170	8,47/160	8,03/150	7,71/130
7	90	6	1	-	-	-	-			9,91/150	9,33/145	8,83/140	8,49/130
8	92	4	0,5	-	-	-	-	2,5	1	9,82/170	9,51/170	9,43/170	9,31/165
9	90		2,5	-	-	-	-			9,79/170	9,47/170	9,31/170	9,15/165
10	92	4	2	-	-	-	-	1	1	9,85/165	9,72/160	9,54/155	9,32/150
11	90		1	-	-	-	-	4		9,79/185	9,55/180	9,39/175	9,27/170
12	91	4	2	-	-	-	-	2,8	0,2	9,83/170	8,77/165	8,32/140	8,04/130
13			1	-	-	-	-		1,2	9,82/170	9,61/170	9,42/165	9,35/165
14	91	4	-	2	-	-	-	2	1	10,31/170	10,07/170	9,91/165	9,83/160
15			-	-	2	-	-			11,49/160	11,23/155	11,0/150	10,91/150
16			-	-	-	2	-			10,79/180	10,59/175	10,45/170	10,21/165
17			-	-	-	-	2			9,22/190	9,11/190	9,01/185	8,80/180

Диапазон оптимальных концентраций ПЭВД соответствует 90-92 %. При 89 % (образец 1) исходная прочность пленки ниже, чем при 90 % (2). Увеличение количества ПЭВД до 92,5 % (5) приводит к заметному снижению деформационно-прочностных показателей пленок в процессе старения из-за уменьшения содержания стабилизатора в композиции.

Область оптимальных концентраций CaCO₃ составляет 4-5 %. При 3 % (6) исходные деформационно-прочностные показатели пленок заметно ниже, чем при 4 % (3, 4, 5). В процессе УФ-старения они становятся еще более низкими. Увеличение концентрации CaCO₃ до 6 % (7) обуславливает уменьшение содержания ПЭВД и заметное ухудшение деформационных характеристик пленок.

Снижение концентрации перметрина до 0,5 % (8) существенно снижает инсектицидность пленки ($m = 73$ %). При содержании перметрина (П) = 2,5 % (9) инсектицидная активность пленки такая же, как при содержании перметрина 1-2 % (образцы 1-5): $m = 100$ %. Область оптимальных концентраций инсектицида 1-2 % мас.

Пластификатор выполняет функции регулятора деформационно-прочностных характеристик пленки и транспортного агента инсектицида в структуре пленки. При содержании ДОФ 1 % (10) снижаются деформационные показатели и инсектицидность пленки, при 4 % (11) они такие же, как и в диапазоне оптимальных концентраций ДОФ = 2-3 % (2, 3, 4).

Диапазон оптимальных концентраций стабилизатора 0,5-1,0 %. При Tinuvin 783 = 0,2 % (12) деформационно-прочностные показатели пленок быстро снижаются в процессе старения. Большое содержание в пленке Tinuvin 783 = 1,2 % (13) не дает преимуществ по сравнению с пленками оптимальных составов 2, 3, 4.

Введение в состав пленки других инсектицидов выбранного ряда – циперметрин (ЦП) (14), β -циперметрин (β -ЦП) (15), пиримифос-метил (ПМ) (16), имидаклоприд (ИМ) (17) – придает пленке инсектицидную активность, аналогично действию перметрина (образцы 1-5).

Оптимальные составы инсектицидных полимерных пленок, модифицированных наноразмерными частицами CaCO_3 , соответствуют образцам 2-4, 14-17. Достоинствами разработанных составов являются повышенная технологичность и отсутствие липкости, изготовленных из них пленок, что упрощает их эксплуатацию.

Результаты ДТА показали, что введение в инсектицидную полимерную пленку наночастиц CaCO_3 снижает интенсивность пиков деструкции и смещает их в сторону более высоких температур на 10-15 °С. Это обусловлено улучшением структуры материала вследствие равномерного распределения дисперсного наполнителя в полимерной матрице.

Введение CaCO_3 в композиции с различными инсектицидами приводит к увеличению степени кристалличности материалов на 8-12 %, что свидетельствует об образовании индивидуальных кристаллических структур за счет протекания физико-механических взаимодействий между компонентами. Молекулы инсектицида, распределенные в рыхлой структуре частиц CaCO_3 , сохраняют свою подвижность и способность к испарению, обеспечивая пролонгированное действие пленки.

По результатам микробиологических исследований активность всех исследованных образцов по отношению к микроорганизмам не зарегистрирована. Разработанная многофункциональная инсектицидная пленка, модифицированная наноразмерными частицами CaCO_3 , не оказывает подавляющего морфологического и физиологического действия на тест-культуры.

Анализ ИК-спектров полимерной композиции на примере ПЭВД/ДОФ/Циперметрин/Tinuvin 783/ CaCO_3 до и после вымывания показал наличие широкой полосы поглощения в области 3406 см^{-1} , описывающей валентные колебания гидроксильной группы. При этом наблюдается смещение полосы поглощения в более высокочастотную область, что является подтверждением образования водородных связей между функциональными группами композиции.

Значения оптических плотностей полос поглощения композиции ПЭВД/ДОФ/Циперметрин/Tinuvin 783 до и после введения наночастиц CaCO_3 приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Оптические плотности полос поглощения инсектицидной композиции ПЭВД/ДОФ/Циперметрин/Tinuvin 783 до и после введения наночастиц минерального наполнителя CaCO_3

Оптическая плотность	Полоса поглощения, см^{-1}					
	3400	2960-2940	2870-2860	1730	1530	872
D_0 (ПЭВД/ДОФ/Циперметрин/Tinuvin 783)	0,232	2,952	2,167	0,864	–	–
D (ПЭВД/ДОФ/Циперметрин/ Tinuvin 783/ CaCO_3)	0,415	5,796	5,724	1,261	0,959	0,740
ΔD	0,183	2,844	3,557	0,397	0,959	0,740

Изменение оптических полос поглощения в спектре композиции ПЭВД/ДОФ/инсектицид/Tinuvin 783 после введения нанопорошка карбоната кальция свидетельствует об адсорбции инсектицида и стабилизатора на поверхности CaCO_3 , что позволяет равномерно распределить незначительное количество модифицирующих реагентов в связующем и придать полимерной композиции новые свойства – технологичность, прочность, стойкость к свето- и термодеструкции, высокую инсектицидную активность по отношению к насекомым-вредителям, длительный срок эксплуатации.

Выводы. Введение наполнителя и носителя целевых добавок – наночастиц CaCO_3 – в инсектицидную полимерную пленку на основе ПЭВД вызывает протекание физико-химических взаимодействий между функциональными группами компонентов, что позволяет получить новый многофункциональный инсектицидный полимерный материал, сочетающий в себе удовлетворительные деформационно-прочностные свойства (высокий предел прочности при растяжении (~11,49 МПа), превышающий предел прочности базового ПЭВД (9,1 МПа)).

Применение многофункциональной инсектицидной укрывной пленки пролонгированного действия позволит решить проблему защиты сельскохозяйственных угодий, лесных хвойных и лиственных насаждений от насекомых-фитофагов, а также позволит снизить потери от воздействия биоагентов, упакованных в пленочные чехлы кератинсодержащих материалов при хранении и транспортировке.

Список использованных источников

1. Лашкина, Е.В. Многофункциональная инсектицидная пленка, модифицированная наноразмерными частицами CaCO_3 / Е.В. Лашкина // Инновационные материалы и технологии – 2020: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Минск, 9-10 янв. 2020 г. / БГТУ; под ред. И.В. Войтова. – Минск, 2020. – С. 45-48.

2. Погодина, Е. Чем наполнить композит / Е. Погодина // Пластик: индустрия переработки пластмасс. – 2011. – № 8. – С. 26-28.

3. Лашкина, Е.В. Разработка многофункциональных полимерных пленок для защиты сельскохозяйственных и лесных угодий от насекомых-фитофагов / Е.В. Лашкина // ПРИРОДНАЯ СРЕДА ПОЛЕСЬЯ и устойчивое развитие агропромышленного комплекса региона: VI Междунар. науч. конф., Брест, 12-14 сент. 2012 г. / ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси»; гл. ред. М.В. Михальчук. – Брест, 2012. – Вып. 5. – С. 156-159.

4. Инсектицидное средство для защиты тканей, меха и изделий из них от моли и кожеда: пат. 2251844 РФ, МПК А01N33/12, D06M13/46 / Г.Я. Легин, Е.Б. Иванова, А.М. Иванов, М.А. Иванов; заявитель Е.Б. Иванова, А.М. Иванов, М.А. Иванов. – № 2003129975/04; заявл. 10.10.03; опубл. 20.05.05 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2005. – Бюл. № 14. – 6 с.

5. Самодиспергирующийся инсектицидный и инсектоакарицидный препарат: пат. 2198511 РФ, МПК А01N25/08, А01N53/00, А01N53/08, А01N63/02 / В.П. Карев, Д.В. Карев, Е.Л. Вахонин; заявитель В.П. Карев, Д.В. Карев, Е.Л. Вахонин. – № 2000124107/13; заявл. 21.09.00; опубл. 20.02.03 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2003.

6. Инсектицидные композиции с замедленным высвобождением: пат. 2475026 РФ, МПК А01N53/06, А01N53/02, А01N25/10, А01N25/02, А01P7/04 / Монсонис Гуэль Эдуард, Кортес Барера Хорди; заявитель ЭС.СИ. ДЖОНСОН ЭНД САН, ИНК. (US). –

№ 2009146030/13; заявл. 23.04.08; опубл. 20.02.13 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2013. – Бюл. № 5. – 11 с.

7. Исследование физико-химических и эксплуатационных свойств инсектицидных композиционных материалов / Н.С. Винидиктова [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 74-78.

8. Стабилизатор для полиолефинов: пат. US 6869992, МПК C08K5/34 / 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.

9. Лашкина, Е.В. Инсектицидная защитная пленка, модифицированная функциональными активными компонентами / Е.В. Лашкина // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 82-87.

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

11. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант [и др.]; под ред. Э.Ф. Олейника. – М.: Химия. 1986. – 472 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: llashkina@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: llashkina@mail.ru.

Поступила в редакцию 28.05.2020 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, (не менее 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 4), 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 (не более 20). 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 14000 typographical units, including spaces, (at least 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 4), 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 (maximum 20). 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-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных 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>