

2021 №1

ISSN 1728-3841

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ



ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения
с Опытным производством» – 30 лет

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 2021

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», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Довгалева А.М. Моделирование процесса деформирования поверхности детали гладким шаром при совмещенном магнитно-динамическом накатывании	5
Дворник А.П., Калинин Ю.В., Клемба В.Л., Березовский Н.И. Повышение надежности и безопасности шахтных подъемных установок	13
Казаченко Г.В., Басалай Г.А. Некоторые задачи оптимизации конструкций и режимов работы ленточных конвейеров	21
Вишняк Б.А., Сереброва Т.В., Колунтаев И.В., Хныкин А.Г. Технология и автоматизированное управление процессами современной калийной обогатительной фабрики	29
Моисеенко В.Л., Дмитриев А.В., Максимчик К.В., Письменная Н.В. Гибридный привод на железнодорожном транспорте	40
Довгало В.А., Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В. Проведение экспериментов на имитационной модели звеноборочной линии КБ03 и анализ полученных результатов	49
Диулин Д.А., Кузнецова М.Г. Подходы к моделированию стволов шахт	55
Высоцкая Н.А., Францкевич В.С. Влагосодержание шихты комплексных удобрений	63
Казаченко Г.В., Басалай Г.А. О повышении эффективности щеленарезных машин ...	71

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Кудина Е.Ф., Приходько И.В. Современные смазочные материалы: тенденции развития и перспективы рециклинга	76
Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Шевчук В.В. Влияние карбоксиметилцеллюлозы различной химической природы на показатели флотации калийной руды	87
Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Буй М.В. Определение оптимальных условий спекания изделий из корундовой керамики	93

На обложке: мобильная буровая установка МБУ-140 для ремонта и бурения нефтяных и газовых скважин.

На 1-й стр.: мобильная буровая установка МБУ-225.

На 3-й стр.: агрегат подъемный ремонтный АПР-50/60 для ремонта нефтяных и газовых скважин.

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)

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи «Белпочта» или по «Интернет-подписке» РУП «Белпочта» на сайте: <https://www.belpost.by/onlinesubscription/items>

Ответственный секретарь А.В. Протасеня

Подписано в печать 23.02.2021 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².

Заказ 687. Усл. печ. л. 11,44. Тираж 110 экз.

Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слущкая укрупненная типография»,
ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слущк, Минская область, Республика Беларусь.

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 2021

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”, 2021

CONTENTS

MACHINE-BUILDING

Dovgalev A.M. Simulation of surface deformation produced by smooth ball under combined magnetodynamic treatment	5
Dvornik A.P., Kalintsau Yu.V., Klemba V.L., Berezovsky N.I. Increasing the safety and reliability of mine winding plants	13
Kazachenko G.V., Basalai R.A. Some construction optimization problems and operating modes of belt conveyors	21
Vishnyak B.A., Serebrova T.V., Koluntaev I.V., Khnykin A.G. Technology and automated process control of a modern potash processing plant	29
Moiseenko V.L., Dmitriev A.V., Maksimchyk K.V., Pismennaya N.V. Hybrid drive on railway transport	40
Dovgualo V.A., Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V. Conducting experiments on the simulation model of the assembly line KB03 and analysis of the results obtained	49
Diulin D.A., Kuzniatsova M.R. Approaches to mine shafts modeling	55
Vysotskaya N.A., Frantskevich V.S. Moisture content of the charge of complex fertilizers	63
Kazachenko G.V., Basalai R.A. About increasing the efficiency of slot-cutting machines	71

MATERIALS ENGINEERING

Kudina H.F., Prihodzko I.V. Modern lubricants: development trends and prospects of recycling	76
Mozheyko F.F., Potkina T.N., Shevchuk V.V. Influence carboxymethyl cellulose of different chemical nature on potassium ore flotation qualitative characteristics	87
Pavlenko A., Akhramenko N., Bui M. Determination of optimal conditions of sintering of corundum ceramic products	93

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793.044(045)(476)

Довгалеv А.М.*Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
ДЕТАЛИ ГЛАДКИМ ШАРОМ ПРИ СОВМЕЩЕННОМ
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОМ НАКАТЫВАНИИ**

Аннотация. В работе представлена математическая модель упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким шаром при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Модель учитывает комплексное магнитно-силовое воздействие на исходную шероховатость поверхности и позволяет установить зависимость глубины внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса совмещенного упрочнения. Выполнено моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной обработке ферромагнитной детали, получена аналитическая зависимость для определения глубины упрочненного поверхностного слоя.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, деформирующий шар, импульсно-ударное деформирование, ударная сила, давление в контакте, площадь контакта, магнитное поле, шероховатость поверхности, глубина внедрения шара.

Dovgalev A.M.*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus***SIMULATION OF SURFACE DEFORMATION PRODUCED BY SMOOTH
BALL UNDER COMBINED MAGNETODYNAMIC TREATMENT**

Abstract. The paper presents a mathematical model of elastic-plastic deformation of surface micro-roughness of a non-rigid ferromagnetic component produced by a smooth ball under combined treatment with a rotating magnetic field and pulsed impact deformation. The model takes into account the combined action of the magnetic field and impacts on the initial surface roughness, which makes it possible to determine dependence of penetration depth of a smooth deforming ball in the surface on physical and mechanical properties of the component material and combined treatment parameters. The process of surface roughness generation during the combined treatment of ferromagnetic components has been modeled, and an analytical dependence for determining the depth of the hardened surface layer has been obtained.

Keywords: finishing and strengthening treatment, deforming ball, pulsed impact deformation, impact force, contact pressure, contact area, magnetic field, surface roughness, penetration depth of the ball.

Введение. При изготовлении машин и оборудования для горнодобывающей отрасли большое внимание уделяется вопросам повышения их долговечности [1, 2].

Решение указанной задачи обеспечивают повышением качественных характеристик входящих в их состав ответственных деталей, как правило, на основе применения технологий поверхностного упрочнения. Для отделочно-упрочняющей обработки дета-

лей широкое применение находят статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования [3].

В настоящее время перспективными являются разработка и применение методов отделочно-упрочняющей обработки, обеспечивающих комплексное энергетическое воздействие на поверхность упрочняемых деталей с целью повышения их качественных характеристик и эксплуатационных свойств.

Комплексное магнитно-силовое воздействие на поверхность нежестких ферромагнитных деталей (далее – деталей) обеспечивает разработанный метод совмещенного магнитно-динамического накатывания, в соответствии с которым на поверхностный слой одновременно воздействуют вращающимся постоянным или переменным магнитным полем с индукцией 0,05-1,20 Тл и многократным импульсно-ударным деформированием, осуществляемым колеблющимися деформирующими шарами инструмента [4-7]. Метод совмещенного магнитно-динамического накатывания обеспечивает: интенсивное снижение исходной шероховатости поверхности по параметру R_a с 6,3-0,40 мкм до 0,60-0,05 мкм; получение на детали модифицированного слоя глубиной 10-25 мкм и наноструктурированного поверхностного слоя толщиной 1,5-3,0 мкм; повышение износостойкости поверхности деталей в 3,0-4,9 раза [8, 9].

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время (в связи с технической новизной предложенного метода совмещенного магнитно-динамического накатывания) отсутствуют математические зависимости взаимосвязи режимов процесса совмещенного упрочнения и конструктивных параметров комбинированного инструмента с характеристиками качества упрочняемого поверхностного слоя детали. Это не позволяет получить научно-обоснованные рекомендации по назначению режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания и осуществлять прогнозирование параметров качества упрочняемых деталей на стадии проектирования операции отделочно-упрочняющей обработки.

В связи с этим актуальной является разработка математической модели упруго-пластического деформирования поверхности гладким шаром, а также моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенной обработке деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Математическое моделирование деформирования поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким шаром.

Рассмотрим упругопластическую модель внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность нежесткой ферромагнитной детали, имеющей исходную шероховатость $Rz_{исх}$.

Величину среднего давления q в контакте при внедрении гладкого деформирующего шара в пластическое полупространство при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием определяем по зависимости [10-12]:

$$q = \frac{N_n}{A_r}, \quad (1)$$

где N_n – максимальное значение нормальной ударной силы деформирования;

A_r – фактическая площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали.

Фактическая площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали равна [13]:

$$A_r = A_k \frac{t_{pk}}{100\%}, \quad (2)$$

где A_k – контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали;
 t_{pk} – относительная контактная длина профиля исходной шероховатости поверхности детали.

Контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с поверхностью детали равна [14]:

$$A_k = 2\pi R_{ш} \cdot h_{вн},$$

где $R_{ш}$ – радиус деформирующего шара;

$h_{вн}$ – глубина внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали.

В связи с наличием подачи инструмента при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием имеет место асимметричное воздействие сферической гладкой поверхности деформирующего шара на исходную шероховатость поверхности детали. В результате контурная площадь контакта гладкого деформирующего шара с деталью уменьшается в два раза и составляет:

$$A_k = \pi R_{ш} \cdot h_{вн}. \quad (3)$$

Максимальное значение нормальной ударной силы деформирования равно [15]:

$$N_n = \frac{2m}{T_n}(U_n - V_n), \quad (4)$$

где m – масса деформирующего шара;

V_n и U_n – нормальная скорость деформирующего шара до и после удара (до и после взаимодействия с упрочняемой поверхностью детали);

T_n – время нормального удара деформирующего шара [16]:

$$T_n = 2,943 \left(\frac{5m}{4K} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot V_n^{-\frac{1}{5}}. \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности K вычисляем по зависимости [16]:

$$K = \frac{2E}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{R_{ш} \cdot R_d}{R_{ш} \pm R_d}}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости (для стали $E = (2,0 \dots 2,1) \cdot 10^5$ МПа);

μ – коэффициент Пуассона ($\mu = 0,25-0,35$);

R_d – радиус поверхности упрочняемой детали.

Знак «+» принимают при обработке наружных, а «-» – при обработке внутренних поверхностей вращения.

Масса деформирующего шара равна [17]:

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi R_{ш}^3, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала деформирующего шара.

После подстановки в уравнение (1) выражений (2-4), (7) имеем:

$$q = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}}. \quad (8)$$

Проведенные многочисленные экспериментальные исследования внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали при совмещенной обработке

вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием показали, что требуемая величина среднего давления в контакте (вследствие магнитного воздействия на материал упрочняемой детали) уменьшается на величину коэффициента k_m (коэффициент k_m определяют экспериментально для материала упрочняемой детали).

Тогда выражение (8) запишем в следующем виде:

$$q = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}} k_m. \quad (9)$$

Для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей с целью минимизации величины их остаточных деформаций под действием ударной силы деформирования величину среднего давления в контакте принимаем в пределах $(0,26 \div 0,63)$ НВ [13].

После преобразований выражение (9) принимает вид:

$$(0,26 \div 0,63) \text{ НВ} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{T_n \cdot h_{вн} \cdot t_{pk}} k_m. \quad (10)$$

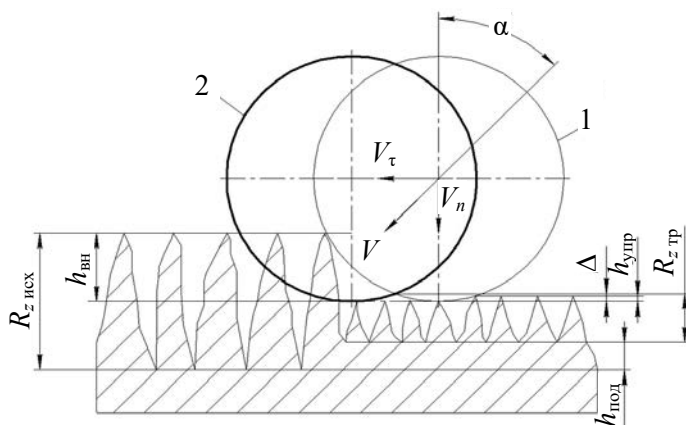
Решая уравнение (10) относительно $h_{вн}$, имеем:

$$h_{вн} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{ш}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{(0,26 \div 0,63) \text{ НВ} \cdot T_n \cdot t_{pk}} k_m. \quad (11)$$

Таким образом, полученная аналитическая зависимость (11) позволяет определить глубину внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность детали при упругопластическом деформировании ее исходных микронеровностей в процессе совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Моделирование процесса формирования шероховатости поверхности при совмещенном магнитно-динамическом накатывании.

Для расчета получаемой высоты шероховатости поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием рассмотрим схему взаимодействия гладкого деформирующего шара с исходной шероховатостью (микронеровностями) упрочняемой поверхности (рисунок 1).



1 – положение образующей первого деформирующего шара в конце удара; 2 – положение образующей очередного деформирующего шара в конце удара

Рисунок 1. – Схема взаимодействия гладкого деформирующего шара с исходной шероховатостью поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), требуемое значение шероховатости поверхности равно [18]:

Согласно расчетной схеме (рисунок 1), требуемое значение шероховатости поверхности равно [18]:

$$R_{z \text{ тр}} = R_{z \text{ исх}} - h_{вн} - h_{под} + h_{упр} + \Delta, \quad (12)$$

где $R_{z \text{ тр}}$, $R_{z \text{ исх}}$ – соответственно требуемая (получаемая) и исходная шероховатость поверхности упрочняемой детали, мкм;

$h_{вн}$ – глубина пластического внедрения гладкого деформирующего шара в поверхность детали, мкм;

$h_{\text{под}}$ – величина подъема впадин исходных микронеровностей под действием ударной силы деформирования, мкм;

$h_{\text{упр}}$ – упругое восстановление шероховатости поверхности, сформированной деформирующим шаром после снятия нагрузки;

Δ – увеличение шероховатости поверхности вследствие наличия подачи деформирующих шаров инструмента, мкм.

Учитывая, что величина $h_{\text{упр}}$ на порядок меньше остальных значений составляющих, входящих в уравнение (12), ею можно пренебречь.

Многочисленные экспериментальные исследования профилограмм поверхности деталей до и после совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием показали, что $h_{\text{под}} \approx \frac{1}{3} h_{\text{вн}}$.

В соответствии с упомянутым допущением и значением величины $h_{\text{под}}$ уравнение (12) примет вид:

$$\begin{aligned} R_{z \text{ тр}} &= R_{z \text{ исх}} - h_{\text{вн}} - \frac{1}{3} h_{\text{вн}} + \Delta; \\ R_{z \text{ тр}} &= R_{z \text{ исх}} - \frac{4}{3} h_{\text{вн}} + \Delta. \end{aligned} \quad (13)$$

Увеличение шероховатости поверхности Δ вследствие наличия подачи деформирующих шаров определяем по известной зависимости [19]:

$$\Delta = \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}}, \quad (14)$$

где S – подача инструмента.

Решая уравнение (13) относительно $h_{\text{вн}}$, имеем:

$$h_{\text{вн}} = \frac{3}{4} (R_{z \text{ исх}} - R_{z \text{ тр}} + \Delta). \quad (15)$$

Приравнявая уравнения (11) и (15), полученные ранее, имеем:

$$\frac{3}{4} \left(R_{z \text{ исх}} - R_{z \text{ тр}} + \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}} \right) = \frac{8}{3} \cdot \frac{\rho \cdot R_{\text{ш}}^2 (U_n - V_n) \cdot 100 \%}{(0,26 \div 0,63) \text{НВ} \cdot T_n \cdot t_{p_k}} \cdot k_m. \quad (16)$$

Уравнение (16) является уравнением взаимосвязи параметров качества обработки (шероховатости получаемой поверхности детали) с режимами процесса совмещенной обработки вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (нормальной скоростью взаимодействия деформирующего шара с упрочняемой поверхностью V_n , подачей инструмента S , величиной индукции, действующего на деталь магнитного поля, учитываемой коэффициентом k_m), характеристиками деформирующего шара ($R_{\text{ш}}$, ρ), твердостью НВ материала упрочняемой детали и временем нормального удара шара T_n .

Для выполнения инженерных расчетов в практической деятельности важно получить простую аналитическую зависимость, позволяющую прогнозировать величину шероховатости поверхности детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Подставим в уравнение (13) значение $h_{\text{вн}}$ [18] и Δ :

$$h_{\text{BH}} = \left(\frac{5}{4} \cdot \frac{mV_n^2}{K} \right)^{\frac{2}{5}}.$$

Тогда имеем:

$$R_{z \text{ тр}} = R_{z \text{ исх}} - \frac{4}{3} \left(\frac{5mV_n^2}{4K} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{1000 \cdot S^2}{8R_{\text{ш}}}, \quad (17)$$

где m – масса деформирующего шара;

K – коэффициент пропорциональности (зависимость (6)) [16].

Определение глубины упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

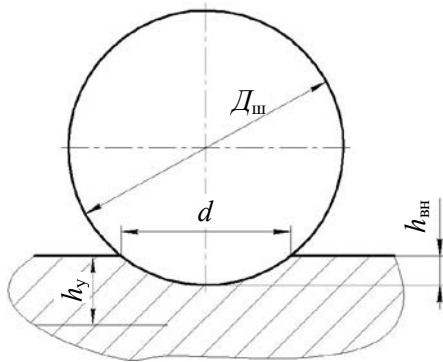
Глубина упрочнения поверхностного слоя детали при ее поверхностном пластическом деформировании определяется зависимостью [20]:

$$h_y = kd, \quad (18)$$

где h_y – глубина упрочнения поверхностного слоя детали;

k – коэффициент пропорциональности ($k = 1,25-1,5$);

d – диаметр отпечатка деформирующего шара при пластическом деформировании поверхности детали.



Известна зависимость взаимосвязи параметров отпечатка деформирующего шара на поверхности детали (рисунок 2) [21]:

$$h_{\text{BH}} \approx \frac{r^2}{D_{\text{ш}}} = \frac{d^2}{4D_{\text{ш}}}, \quad (19)$$

где r – радиус отпечатка деформирующего шара.

Определим значение d из зависимости (19):

$$d = 2 \cdot \sqrt{h_{\text{BH}} \cdot D_{\text{ш}}}. \quad (20)$$

После преобразования уравнение (18) имеет вид:

$$h_y = 2k \cdot \sqrt{h_{\text{BH}} \cdot D_{\text{ш}}}. \quad (21)$$

С учетом значения h_{BH} (11), а также увеличением глубины упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке концентрированным потоком энергии вращающегося магнитного поля и импульсно-ударным деформированием, обусловленной магнитным воздействием на поверхность детали, выражение (21) принимает вид:

$$h_y = 8k \cdot k_1 \sqrt{\frac{1}{3} \frac{\rho \cdot R_{\text{ш}}^3 (U_n - V_n) \cdot 100\%}{(0,26 \div 0,63) \text{ НВ} \cdot T_n \cdot t_{p_k}}} k_m, \quad (22)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности, учитывающий комплексное энергетическое воздействие на упрочняемую поверхность детали вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием (k_1 определяется экспериментально для материала упрочняемой детали и условий обработки).

Заключение. Разработана математическая модель упругопластической деформации микронеровностей поверхности нежесткой ферромагнитной детали гладким де-

формирующим шаром при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Математическая модель учитывает комплексное магнитно-силовое воздействие на исходную шероховатость поверхности детали и позволяет установить зависимость глубины внедрения гладкого деформирующего шара в упрочняемую поверхность от физико-механических свойств детали, основных параметров инструмента и режимов процесса совмещенного упрочнения.

Разработана математическая модель процесса формирования шероховатости поверхности нежесткой ферромагнитной детали при совмещенной обработке вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием. Получено уравнение взаимосвязи шероховатости поверхности обрабатываемой ферромагнитной детали с физико-механическими свойствами деформируемого материала, основными параметрами инструмента и режимами процесса упрочнения, позволяющее прогнозировать шероховатость поверхности детали на стадии проектирования операции отделочно-упрочняющей обработки.

Получена аналитическая зависимость, позволяющая определить глубину упрочненного поверхностного слоя при совмещенной обработке деталей вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием.

Список использованных источников

1. Технология производства и ремонт горных машин // Р.П. Дидык [и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 1996. – 440 с.
2. Технология машиностроения и ремонта горных машин / Г.Н. Солод [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 421 с.
3. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под. ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – 394 с.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалева; заявитель А.М. Довгалева. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюл. № 31. – 7 с.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалева; заявитель А.М. Довгалева. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюл. № 25. – 7 с.
6. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности отверстия в ферромагнитной детали; пат. 22193 Респ. Беларусь, МПК В24В39/02 / В.К. Шелег, А.М. Довгалева, А.А. Жолобов, Д.М. Свирепа, С.А. Сухоцкий, М.В. Мовчан; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а20140015; заявл. 03.01.14; опубл. 30.10.18 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2018. – № 4. – 8 с.
7. Довгалева, А.М. Динамическая модель процесса совмещенного магнитно-центробежного накатывания / А.М. Довгалева, Н.А. Леванович, И.А. Тарадейко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 37-48.
8. Довгалева, А.М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А.М. Довгалева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18-35.
9. Шелег, В.К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В.К. Шелег, А.М. Довгалева // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330-334.

-
10. Дрозд, М.С. Инженерные расчеты упругопластической деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
11. Котенева, Н.В. Упругопластический динамический контакт твердых тел / Н.В. Котенева. – Барнаул: АлтГТУ, 2011. – 127 с.
12. Сидякин, Ю.И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06 / Ю.И. Сидякин; Науч.-произв. объединение по технол. машиностроения. – М., 2002. – 34 с.
13. Гуров, Р.В. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин с учетом их функционального назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Р.В. Гуров. – Брянск, 2012. – 303 л.
14. Цикунов, А.Е. Сборник формул по математике / А.Е. Цикунов. – СПб., 2002. – 160 с.
15. Свирепа, Д.М. Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д.М. Свирепа; ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2013. – 26 с.
16. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
17. Гусев, В.А. Математика: справ. материалы: кн. для учащихся / В.А. Гусев, А.Г. Мордкович. – М.: Просвещение, 1988. – 416 с.
18. Сухоцкий, С.А. Технологическое обеспечение качества плоских поверхностей деталей машин магнитно-динамическим накатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.А. Сухоцкий; Белорусско-Российский университет. – Могилев, 2017. – 24 с.
19. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фильдштейн, М.А. Корониевич. – 2-е изд. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с.
20. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа: сборник статей / Под ред. д-ра техн. наук проф. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1965. – 212 с.
21. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
-

Информация об авторе

Довгалева Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент, декан факультета довузовской подготовки и профориентации, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: bru@bru.by.

Information about the author

Dovgalev Aleksandr Mikhailovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of pre-university education and professional orientation Faculty, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: bru@bru.by.

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

УДК 622.673-78(042.3)(476)

Дворник А.П.¹, Калинин Ю.В.¹, Клемба В.Л.², Березовский Н.И.³¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь²Солигорский межрайонный отдел Минского областного управления Госпромнадзора,
г. Солигорск, Беларусь³Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

Аннотация. При эксплуатации шахтного подъема возникает сложная проблема: действительный возраст подъемных машин в несколько раз превышает нормативные сроки их эксплуатации. Эта проблема просматривается во многих отраслях промышленности, обосновывается тем, что у предприятий отсутствуют материальные средства на замену дорогостоящего оборудования. За время эксплуатации этого оборудования научные разработки и элементная база ушли далеко вперед. Предлагаются совершенно новые приводы и системы их управления и контроля, повышающие производительность, надежность и безопасность.

Ключевые слова: шахтная подъемная установка, промышленная безопасность, эксплуатационная надежность, автоматизированная система управления, остаточный ресурс.

Dvornik A.P.¹, Kalintsau Yu.V.¹, Klemba V.L.², Berezovsky N.I.³¹JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus²Soligorsk interdistrict department of the Minsk regional department of Gospromnadzor, Soligorsk, Belarus³Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

INCREASING THE SAFETY AND RELIABILITY OF MINE WINDING PLANTS

Abstract. When operating a mine hoist, a complex problem arises: the actual age of hoisting machines is several times higher than the standard terms of their operation. This problem can be seen in many industries. It can be explained by the fact that enterprises do not have the material resources to replace expensive equipment with new ones. During the operation of this equipment, scientific developments and element base have gone far ahead. Completely new drives and their control and monitoring systems are offered in terms of productivity, reliability and safety.

Keywords: mine winding plant, industrial safety, operating reliability, automated control system, residual life.

Введение. В современных экономических условиях могут успешно работать только те предприятия, которые постоянно увеличивают свою эффективность. Поэтому любое горное предприятие заботится об увеличении добычи и снижении затрат. Увеличение добычи, в первую очередь, требует повышения производительности шахтных подъемных установок (ШПУ) предприятия. Не малую роль в экономике подземного предприятия играет экономичность подъема, увеличение грузоподъемности, скоростей движения, снижение времени погрузочно-разгрузочных операций, повышение точности работы электроприводов, отказ от применения отдельных механических узлов или замена их на более современные.

В технологическом комплексе любого рудника или шахты самым «узким» местом является его часть, называемая рудничным подъемом. Выдача полезных ископаемых, перемещение любых грузов и людей между подземной частью рудника и поверх-

ностью или подземными горизонтами осуществляется также с помощью шахтного подъема. Таким образом, от состояния подъема зависит не только производительность и рентабельность, но и само существование рудников и шахт.

ШПУ рудников являются по сути транспортными установками, перемещающими грузы по вертикали на глубину сотен метров. Поэтому шахтный подъем должен быть еще и безопасен.

Основная часть. Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации ШПУ, является значительное количество аварийных ситуаций. При этом около 50 % аварий связано с нарушением режима движения подъемного сосуда (скипа) в шахтном стволе. Так, например, сдвигение проходного сечения ствола – при разрушении крепи, обмерзании стенок и разгрузочных кривых, а также при неравномерном износе направляющих устройств – создает опасность заклинивания в нем опускающегося сосуда. Отсутствие контроля за действительным положением сосуда в стволе может привести к тому, что сматывающаяся на него ветвь каната (напуск каната), добавляя общий вес, в конечном счете, протолкнет сосуд, который начнет падать, как свободное тело, создавая аварийную ситуацию. Как показали проведенные исследования, многие технические решения устройств защиты от «напуска каната» выбираются без необходимого обоснования, а некоторые из них оказываются недостаточно эффективными для обеспечения надежной работы ШПУ [1]. На основе анализа работы известных устройств защиты ШПУ формируются требования к этим устройствам, определяются статические и динамические нагрузки, возникающие при аварийных ситуациях, которые используются в качестве исходных расчетных данных.

Анализ известных технических решений устройств защиты от напуска каната ШПУ позволяет сделать следующие выводы.

1. Устройства с контролем прогиба струны каната имеют ограничения по глубине ствола и невысокое быстродействие.

2. Установка магнитоупругих и тензометрических датчиков под подшипником копрового шкива не обеспечивает достаточную точность измерений.

3. В процессе работы датчиков изменяются их электрические параметры, что требует периодической перенастройки защиты в целом.

4. Также не являются надежными устройства, в которых по тяговому канату передаются акустические или электромагнитные колебания. С одной стороны, это связано с тем, что волны, передаваемые по тяговым канатам, склонны к искажениям под действием разных концевых нагрузок (изменяют свою скорость в зависимости от плотности материала каната), вследствие чего вносится ошибка в принимаемую частоту. С другой стороны, эксплуатационную сложность представляет прием самих колебаний. При движении тяговый канат истирает скользящие контакты приемников, нарушая силу их прижатия. Это приводит к изменению амплитуды волны, создавая «дрейф» нуля и потерю чувствительности.

5. Не оправдали себя и устройства защиты с нанесением на тяговый канат магнитных меток, так как с течением времени они теряют свою магнитную индукцию, вследствие рассеивания остаточного магнитного потока в тяговом канате, что снижает надежность устройства и требует повторного, очень точного нанесения на канат новых магнитных меток.

6. Недостатком устройств с дистанционной передачей сигнала при зависании сосуда является то, что источник питания передатчика, располагаемый на сосуде, требует периодического контроля его работоспособности.

На основе изложенного могут быть сформулированы следующие основные требования к конструированию устройств защиты от напуска каната в ШПУ:

- высокая надежность отдельных элементов и аппаратов защиты в целом;

- целесообразность использования систем, работающих без непосредственного контакта с подвижными элементами установки (такие датчики обладают существенно большей надежностью и безотказностью в работе и позволяют создавать аппаратуру с искробезопасными параметрами, что очень важно для шахт, опасных по газу и пыли);
- необходимость контроля зависания сосуда как в разгрузочных кривых, так и по глубине ствола;
- возможность непрерывного контроля параметров движения подъемного сосуда;
- обеспечение контроля максимального числа защищаемых параметров;
- обеспечение самоконтроля работоспособности устройств защиты от напуска каната.

Эффективное применение автоматизированных систем управления (АСУ) ШПУ во многих случаях сдерживается из-за отсутствия надлежащих средств получения текущей информации о движении подъемных сосудов в стволе. Так, до сих пор скорость и положение подъемного сосуда контролируются устройствами, связанными с вращением канатного барабана подъемной машины, что не всегда отражает действительную ситуацию в стволе в целом. В то же время, технические возможности радиоэлектроники последних лет, появление технологий формирования интегральных микросхем и полупроводниковых высокочастотных элементов и радиоволновых методов и средств измерения физических величин используются в недостаточной степени [2]. Например, в настоящее время на основе применения радиоволновых методов решена проблема бесконтактного измерения (без непосредственного соприкосновения с объектом) таких параметров объекта управления, как скорости и ускорения. Указанные обстоятельства вызывают необходимость совершенствования известных способов измерения параметров работы ШПУ и поиска новых технических решений.

Использование аварийных ситуаций в качестве расчетных данных позволяет определить пределы возможностей известных технических решений устройств защиты ШПУ и проводить целенаправленный поиск принципиально новых, что представляет несомненный интерес для их проектирования. При применении этого подхода появляется возможность существенного понижения коэффициентов запаса канатов и элементов механизмов за счет предотвращения недопустимых режимов работы.

Исследования эксплуатационной надежности электрооборудования ШПУ и анализ полученных экспериментальных данных позволили классифицировать причины возникновения отказов как конструктивные, производственные и эксплуатационные [3, 4]. Результаты анализа приведены в таблице. Данные свидетельствуют о том, что возникшие эксплуатационные отказы составляют большую часть – 57,5 %. При этом эксплуатационные причины возникновения отказов в 2,6...2,8 раза больше прочих.

Исследования эксплуатационных показателей электрооборудования ШПУ свидетельствует о том, что срок службы разного вида электрооборудования меняется в интервале от 0,02 года (кратковзамкнутые витки электродвигателя) до 12 лет (обмотка статора). При этом средняя наработка между отказами – находится в пределах 103...5810 ч, среднее время восстановления – 1,54...3,94 ч.

Приводной электродвигатель считается одним из основных узлов ШПУ с максимальными показателями. Примерно 78 % отказов дают щеточные контакты и подшипниковые узлы, а также обмотки статора и ротора.

Основными отказами этих элементов являются: износ контактных щеток и колец – 87 % отказов щеточного узла; распайка соединений «петушков» и роторной шины – 92 % отказов обмотки ротора; износ нижних вкладышей – 80 % отказов узла подшипника скольжения; межвитковое замыкание и пробой изоляции – около 100 % отказов обмотки статора.

Таблица. – Причины возникновения отказов

Наименование совокупности элементов	Причины возникновения отказов, %		
	конструктивные	производственные	эксплуатационные
Механическая часть:			
интервал изменения	6,9...50	1,6...85,4	14,6...80,4
математическое ожидание	12,0	21,6	61,2
стандарт	15,7	27,3	26,2
Электрическая часть:			
интервал изменения	7,4...49,3	6,3...29,5	7,3...92,6
математическое ожидание	28,8	23,1	54,3
стандарт	15,4	15,0	23,6
ШПУ в целом:			
интервал изменения	3,7...25,6	2,0...29,7	5,7...44,7
математическое ожидание	20,3	22,2	57,5
стандарт	25,2	34,3	40,5

Создание АСУ надежностью ШПУ является одним из вариантов повышения долговечности и безотказности. Такая система предполагает диагностируемый контроль основных электрических и механических элементов ШПУ, сбор и первичную обработку информации через датчики, визуализацию и управление показателями надежности ШПУ.

Основным назначением системы технической диагностики является повышение эксплуатационной надежности объекта диагностирования путем предоставления информации об оборудовании с заданной вероятностью, достаточной для обеспечения безаварийной эксплуатации объекта, оптимизации его ремонтно-технического обслуживания и оптимизации управления технологическим процессом за счет снижения материальных затрат и трудоемкости при проведении технического обслуживания и ремонта, а также уменьшения расходов на эксплуатацию диагностического оборудования.

Специалисты ООО «Региональный канатный центр» и Пермского государственного технического университета создали систему компьютерного мониторинга за функционированием ШПУ, на базе которой был разработан типовой ряд регистраторов параметров установки РПУ-03.х. Их применение позволяет: фиксировать циклы эксплуатации подъемной установки; контролировать режимы ее работы; определять причины возникновения аварийной ситуации; следить за выполнением работ по техническому обслуживанию и ремонту; определять и регистрировать положение, скорость и направление движения подъемных сосудов.

Показано, что оснащение регистраторами параметров ШПУ позволяет значительно повысить надежность их эксплуатации при выдаче полезного ископаемого, а также при спуске и подъеме людей и грузов. Отмечено, что от надежной и безаварийной работы таких установок зависят безопасность шахтеров и бесперебойное функционирование всего предприятия [5-7].

Предложен метод оценки остаточного ресурса ШПУ, учитывающий фактическое техническое состояние элементов установки и режим работы. Информация, полученная регистратором параметров работы, используется для математического описания интенсивности нагружения элементов установки.

Однако, за последние годы парк подъемных машин стареет. Система привода постоянного тока типа Г-Д, которая преимущественно используется на ШПУ большой мощности, состоит из четырех электрических машин, три из которых коллекторного типа, имеет большую стоимость и энергопотребление.

Основные недостатки и причины замены скиповых ШПУ следующие:

- усталостные трещины на органах навивки, ступицах, на сварных швах ребер;
- приварные ступицы органа навивки к главному валу создают дополнительные напряжения в обечайке барабана;
- недостатки в конструкции тормозных балок, в которых сварные швы ребер жесткости сведены в одну точку концентратора напряжений;
- достаточно сложная регулировка переставной части барабана на машинах БЦК при выравнивании длин канатов;
- быстрый износ валиков тормозной системы (практически при каждой годовой ревизии и наладке машины требуется замена валиков и втулок по причине увеличенного зазора);
- тормозная система собрана на устаревшей элементной базе, наладку которой выполнить достаточно сложно;
- высокая энергоемкость привода;
- несовершенная система регистраторов параметров работы машин и др. Например, состояние проводников и канатов проверяется путем ежесуточного визуального контроля по всей длине специально обученными работниками. При этом возникновение повреждения, в том числе, в результате которого может произойти авария, не будет обнаружено до следующего осмотра.

Основными направлениями решения этих задач являются замена ШПУ, модернизация, оснащение автоматическими системами своевременного обнаружения нарушений в режимах работы и принятие необходимых мер по предупреждению аварий, применение систем защит и блокировок.

В общем случае граница целесообразного применения редукторного и безредукторного электроприводов определяется по результатам исследований с учетом многих факторов стоимости и целесообразности.

Современная конструкция ШПУ при качественном монтаже, квалифицированно налаженная и тщательно обслуживаемая, должна работать стабильно и безопасно [8].

Для безопасной и надежной работы ШПУ, своевременного обнаружения нарушения режимов работы и принятия необходимых мер по предупреждению аварии используют систему защиты и блокировки, являющуюся составной частью системы управления. Взаимосвязанное действие защит и блокировок позволяет избежать (предупредить) аварии на ШПУ.

В то же время, защита не должна мешать нормальной работе ШПУ. Это обстоятельство предъявляет повышенные требования к элементам защиты. Однако имеются случаи аварий по причине принципиально неверно выполненной защиты, отсутствия самоконтроля, несовершенства отдельных аппаратов защиты и блокировки, и отсутствия периодических проверок их элементов.

Требования, предъявляемые к аппаратам защиты и блокировки:

- высокая надежность;
- постоянная готовность к работе;
- проверка готовности аппаратов должна осуществляться как в ручном, так и в автоматическом режимах;
- простота настройки с обеспечением ее фиксации;
- отсутствие ложных срабатываний (высокая надежность отдельных элементов и аппаратов защиты в целом), стабильность работы;
- должны быть исключены срабатывания защитных устройств, вследствие их чрезмерной чувствительности к контролируемому параметру;
- охват как можно большего числа защищаемых параметров.

Ранее при проектировании защит использовались методы, основанные на определении реакции аппаратов защиты на специальные контрольные или рабочие сигналы, причем количество таких сигналов было ограничено. Выработка такой системой управления как каких-либо защитных мер, так и воздействий управления на основе логического анализа многих параметров работы ШПУ в режиме реального времени была невозможна. Новые системы управления, в основе которых лежит микропроцессорная техника, уже позволяют не только оснастить ШПУ необходимым количеством датчиков для получения исчерпывающей информации о функционировании всех узлов ПУ и параметров движения сосудов, но и автоматически принимать решения по управлению и реализовывать их быстрее человека. При этом вероятность ошибочных действий исключается почти полностью.

Увеличение скоростей и грузоподъемности сосудов ведет к увеличению и динамических нагрузок, что может приводить к разрушению элементов ШПУ при слишком резком торможении или ускорении. Поэтому старая система защит и блокировок, в которой возникновение аварийной ситуации приводило к мгновенному отключению электропривода с резким наложением предохранительного тормоза или простому оповещению машиниста с помощью сигнализации, становится небезопасной.

Дальнейшая интенсификация работ в горнорудной промышленности требует применения высокопроизводительной техники, применения более мощного, скоростного и точного электропривода, механизации и автоматизации производственных процессов, совершенствования средств защиты, связи, сигнализации и повышения безопасности работ.

Ранее для применения на ШПУ были пригодны только два типа электроприводов: постоянного тока большой мощности и переменного тока с асинхронным двигателем с фазным ротором сравнительно малой мощности и, преимущественно, с ручным управлением. Автоматизации поддавались в основном приводы постоянного тока. Появление силовой электроники и микропроцессорной техники привели к тому, что появились электроприводы, более приемлемые для применения на ШПУ. К ним относятся приводы с синхронными или асинхронными двигателями с частотным управлением скоростью вращения, а также с индукторными двигателями с электронным управлением.

В настоящее время современные приводы и системы управления выполняются с применением унифицированных систем микропроцессорной программируемой техники (например: промышленные контроллеры). Это значит, что новые приводы, как правило, без проблем сопрягаются с любыми микропроцессорными средствами. К таким средствам относятся, например, программируемые контроллеры S7 (и другие) фирмы «Сименс».

Программируемые контроллеры типа S7 Сименс могут включать в свой состав следующие элементы.

1. Модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от степени сложности решаемых задач в программируемом контроллере могут использоваться более 20 типов центральных процессоров.

2. Блоки питания (PS) для питания контроллера от сети переменного или постоянного тока.

3. Сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов, в том числе Fail Safe, и модули со встроенными Ex-барьерами.

4. Коммуникационные процессоры (CP) – интеллектуальные модули, выполняющие автономную обработку коммуникационных задач в промышленных сетях AS-Interface, PROFIBUS, Industrial Ethernet, PROFINET и системах PtP связи. Применение дополнительного программного обеспечения позволяет расширить коммуникационные возможности контроллера поддержкой обмена данными в сетях MODBUS RTU, MODBUS/TCP, BACnet и KNX/ EIB. Для работы в системах телеуправления S7-300 может дополняться аппаратурой и программным обеспечением SINAUT ST7 и SIPLUS RIC.

5. Функциональные модули (ФМ) – интеллектуальные модули, оснащенные встроенным микропроцессором и способные выполнять задачи автоматического регулирования, взвешивания, позиционирования, скоростного счета, управления перемещением и т.д. Имеют высокую мощность благодаря наличию большого количества встроенных функций.

Универсальный модульный программируемый контроллер имеет свободное наращивание функциональных возможностей при модернизации системы управления для максимальной адаптации к требованиям решаемой задачи.

Комплексное решение проблемы развития электропривода ШПУ в направлении повышения эффективности работы является актуальным. Однако до сих пор к ШПУ предъявляются требования безопасности, которые не учитывают появление новых видов приводной техники, микропроцессорных программируемых систем управления, а так же конструкционных материалов. Как следствие, существующие требования промышленной безопасности не содержат требований к современным техническим средствам и условиям применения их в шахтном подъемном оборудовании. При этом некоторые требования не допускают применения новых технических средств.

Так «Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь» [9] допускают применение асинхронных двигателей только с системой динамического торможения, поэтому применение привода с асинхронным двигателем с частотным управлением, характеристики которого и надежность более подходят, не допускают. С другой стороны, отсутствуют требования к системам управления с открытым программным обеспечением. В результате применяющиеся в Беларуси системы управления ШПУ с открытым программным обеспечением позволяют эксплуатирующей организации бесконтрольно изменять любые параметры, в том числе и параметры безопасности.

Анализ «Правил промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь» [9] показывает, что глава 31 «Подъемные машины и лебедки» нуждается в переработке с учетом вышесказанного для повышения требований к системам приводов и их управления и, соответственно, повысит уровень безопасности подъема.

Выводы. Современная микропроцессорная техника позволяет оснастить автоматическими системами контроля и принятия управленческого решения такие процессы диагностики и контроля технического состояния подъемных установок, которые до сих пор выполнялись только старой системой защит и блокировок и визуальным методом, при котором решения принимаются на основе субъективного опыта. Сегодня этот процесс вместе с принятием решения вполне может быть автоматизирован, только на сегодняшний день не сформулированы требования промышленной безопасности к современным автоматическим системам диагностики и контроля.

Список использованных источников

1. Кузнецов, Н.К. Вопросы совершенствования устройств защиты шахтных подъемных установок от аварийных ситуаций / Н.К. Кузнецов // Вестник ИрГТУ. Машиностроение и машиноведение. – 2015. – № 10. – С. 62-66.
2. Кузнецов, Н.К. Динамика управляемых машин с дополнительными связями: монография. – Иркутск: ИрГТУ, 2009. – 288 с.
3. Жустиков, Ф.Б. Надежность шахтных подъемных установок / Ф.Б. Жустиков, А.М. Нурахмет, Н.М. Нурахметов // Технические и математические науки. – М., 2013. – С. 85-90.
4. Макаров, М.И. Исследование эксплуатационной надежности высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок: автореф. дис. ... канд.

техн. наук: 05.173 / М.И. Макаров; Донецкий ордена Трудового Красного Знамени политехн. ин-т. – Донецк, 1972. – 27 с.

5. Стрелков, М.А. Применение регистраторов параметров для оценки остаточного ресурса шахтных подъемных установок / М.А. Стрелков, В.С. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 16: Горная механика и транспорт. – С. 332-338.

6. Стрелков, М.А. Метод определения основных характеристик шахтных подъемных установок в режиме реального времени // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 4. – С. 314-318.

7. Повышение безопасности эксплуатации подъемных установок на шахтах Воркутского месторождения / Д.В. Третьяк [и др.] // Безопасность труда в промышленности. – 2015. – № 10. – С. 91-94.

8. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок / под общ. ред. В.А. Корсуна, Г.Д. Трифанова. – 4-е изд. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014. – 616 с.

9. Правила промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь утв. Постановлением МЧС Республики Беларусь № 45 от 30.08.2012 г. (в ред. Постановлений МЧС № 10 от 10.04.2014; № 34 от 19.11.2014; № 7 от 23.03.2017).

Информация об авторах

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.

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

Клемба Виктор Леонидович – главный государственный инспектор, Солигорский межрайонный отдел Минского областного управления Госпромнадзора (ул. Коржа, 5Б, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: srgti@mail.ru.

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.

Information about the authors

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

Kalintsau Yury Viktaravich – master, Ph. Sc. Student, Belarusian National Technical University, Head of Production of the Experimental Workshop, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlova Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: ipr@sipr.by.

Klemba Viktor Leonidovich – Chief State Inspector, Soligorsk interdistrict department of the Minsk regional department of Gospromnadzor (5B, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: srgti@mail.ru.

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.

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

УДК 622.673.83-562(045)(476)

Казаченко Г.В., Басалай Г.А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

Аннотация. Рассмотрены вопросы взаимодействия конвейерных лент с ведущими барабанами. Составлены зависимости для вычисления затрат энергии на ее диссипацию. Выполнен анализ возможных вариантов снижения этих энергозатрат за счет конструктивных элементов и режимов работы ленточного конвейера.

Ключевые слова: конвейер, лента, барабан, трение, диссипация энергии.

Kazachenko G.V., Basalai R.A.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

SOME CONSTRUCTION OPTIMIZATION PROBLEMS AND OPERATING MODES OF BELT CONVEYORS

Abstract. The issues of interaction of conveyor belts with driving drums are considered. Dependencies for calculating energy consumption for its dissipation have been compiled. The analysis of possible options for reducing these energy costs due to structural elements and operating modes of the belt conveyor is carried out.

Keywords: conveyor, belt, drum, friction, energy dissipation.

Введение. Ленточные конвейеры одни из наиболее распространенных средств механизации непрерывных транспортных работ. Они используются практически во всех сферах хозяйственной деятельности человечества. Количество таких конвейеров в мире вряд ли поддается прямому исчислению. Не менее велико и разнообразие конструкций конвейеров. Вследствие этого не снижается поток публикаций [1-10], посвя-

щенных этим конвейерам. Одной из важнейших проблем при обосновании конструктивных параметров конвейеров является рациональный выбор их как с точки зрения обеспечения требуемых безотказности и долговечности, так и минимизации диссипации энергии при их работе.

В большинстве публикаций по вопросам взаимодействия ленты конвейера с барабаном или ремня плоскоременной передачи со шкивом за основу принимается знаменитая формула Леонарда Эйлера, которая выражает соотношение между натяжениями невесомой и нерастяжимой нити по дуге контакта с цилиндрической поверхностью, относительно которой скользит нить (рисунок 1). Эта формула применительно к ведущему барабану ленточного конвейера имеет вид:

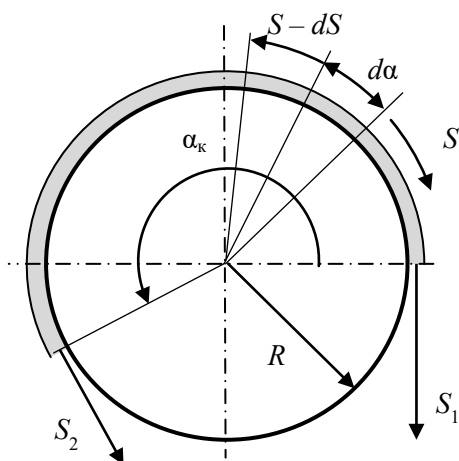


Рисунок 1. – Расчетная схема к составлению уравнений равновесия ленты, прижимаемой к барабану усилиями S_1 и S_2

$$S_1 = S_2 \cdot e^{f \cdot \alpha_k}, \quad (1)$$

где S_1, S_2 – натяжения нити в начальной и концевой точках ее контакта с барабаном;

e – основание натуральных логарифмов;

f – коэффициент трения между нитью и цилиндрической поверхностью;

α_k – угол контакта нити с цилиндрической поверхностью.

Формула Л. Эйлера получена решением обыкновенного дифференциального уравнения:

$$-\frac{dS}{S} = f \cdot d\alpha, \quad (2)$$

которое следует из уравнений равновесия элементарного участка нити длиной $R \cdot d\alpha$ (рисунок 1). Из одного из этих уравнений следует соотношение:

$$p = \frac{S}{B \cdot R}, \quad (3)$$

где p – текущее значение нормального давления между лентой и барабаном;

B – ширина ленты;

R – радиус ведущего барабана.

В задаче Л. Эйлера рассматривается трение некоторой идеальной нити о цилиндрическую поверхность. Ленты конвейеров и ремни плоскоременных передач обладают значительными размерами и массами, что отображается на характере их взаимодействия с барабанами и шкивами. Учету этих особенностей и посвящена настоящая статья.

Содержание и некоторые результаты исследований. Согласно формуле Л. Эйлера натяжение S ленты конвейера по дуге контакта ее с ведущим барабаном зависит только от коэффициента трения между ними и положения рассматриваемой точки на барабане, которое задается углом α . Согласно (3) давление p распределяется по дуге контакта по такому же закону как и натяжение S . Дифференцируя (3) получаем:

$$\frac{dp}{d\alpha} = \frac{dS}{d\alpha} \frac{1}{B \cdot R}, \quad (4)$$

т.е. производные $\frac{dp}{d\alpha}$ и $\frac{dS}{d\alpha}$ отличаются постоянным множителем.

Согласно формуле Л. Эйлера:

$$\frac{dS}{d\alpha} = -f \frac{S_1}{e^{f \cdot \alpha}}, \quad (5)$$

а

$$\frac{dp}{d\alpha} = -\frac{f}{B \cdot R} \cdot \frac{S_1}{e^{f \cdot \alpha}}. \quad (6)$$

Графики отношения $\frac{S}{S_1}$ и производной $\frac{dS}{d\alpha}$ от угла α представлены на рисунке 2.

Эти графики убеждают, что интенсивность снижения S резко падает с возрастанием угла контакта ленты с барабаном.

Оценка интенсивности снижения силы T трения между лентой и ведущим барабаном при увеличении угла контакта между ними приведена на рисунке 3. На этом рисунке также приведена оценка роста относительной силы трения при увеличении угла контакта.

Графики, приведенные на рисунках 2 и 3, свидетельствуют о том, что при углах контакта, больших угла π , на части дуги контакта, соответствующей углу π , реализуется 80 % силы трения между лентой и барабаном. Тогда как на интервале $[\pi; 3\pi/2]$ –

только 10 %. Поэтому возникает вопрос о целесообразности увеличения угла контакта ленты с барабаном до значений, превышающих π , т.к. при $\alpha_k > \pi$ требуется установка дополнительного обводного барабана на нерабочей ветви конвейера. Это увеличивает общее сопротивление движению ленты, а также увеличивает число ее изгибов, что снижает ее долговечность (ресурс).

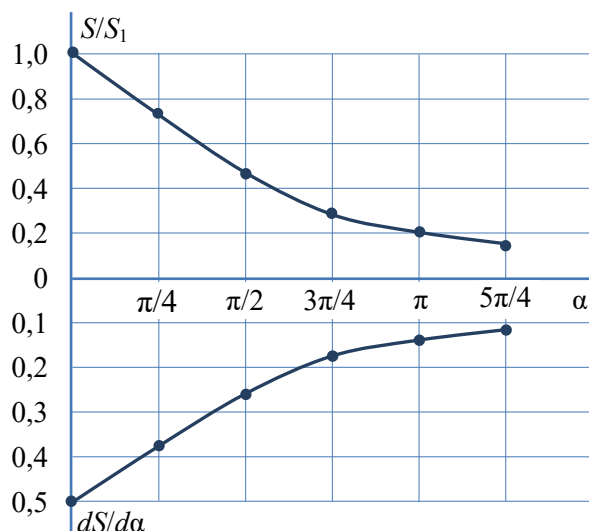


Рисунок 2. – Зависимости S/S_1 и $dS/d\alpha$ от α при $f=0,5$

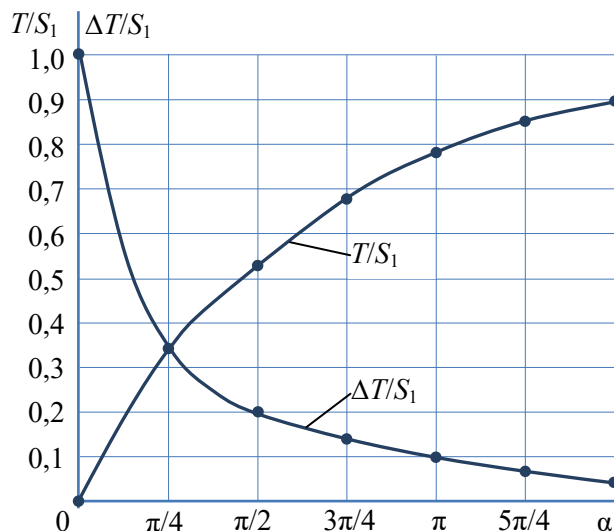


Рисунок 3. – Влияние угла контакта ленты с барабаном на силу трения

Сила трения между лентой и барабаном:

$$T = S_2 - S_1 = \int_0^{\alpha_k} f \cdot p \cdot B \cdot R \cdot d\alpha \quad (7)$$

зависит от величины давления p между лентой и барабаном и его распределения по дуге контакта. При использовании формулы Л. Эйлера:

$$S_2 - S_1 = \frac{S_1}{e^{f \cdot \alpha_k}} (e^{f \cdot \alpha_k} - 1). \quad (8)$$

Возможны и другие законы распределения давления p по дуге контакта. Однако формула Л. Эйлера, согласно которой

$$p = \frac{p_1}{e^{f \cdot \alpha}}, \quad (9)$$

где p_1 – давление ленты на барабан в точках ее сбега, соответствует уравнениям равновесия ленты, удобна в практическом использовании и повсеместно применяется в расчетной практике.

Давление между лентой и барабаном в процессе работы конвейера вычислим с учетом центробежных сил инерции и сопротивления ленты изгибу:

$$p = p_S - p_{ин} - p_{из}, \quad (10)$$

где p_S – давление за счет сил S_1 и S_2 натяжения ленты;

$p_{ин}$ – снижение давления за счет действия сил инерции;

$p_{из}$ – снижение давления за счет сил сопротивления изгибу ленты.

Эти давления могут быть вычислены по следующим формулам:

$$p_{ин} = \rho_l \cdot h_l \cdot R \cdot \omega^2, \quad (11)$$

$$p_{из} = \frac{h_l^2 \cdot E_l}{2R^2}, \quad (12)$$

где ρ_l – плотность ленты;

h_l – толщина ленты;

ω – угловая скорость барабана;

E_l – модуль упругости ленты.

Последнее соотношение получено на основании использования формулы Лапласа в теории оболочек, согласно которой

$$\sigma_{из} = \frac{p_{из} \cdot R}{h_l}, \quad (13)$$

где $\sigma_{из}$ – напряжение изгиба в оболочке.

С другой стороны, используя закон Гука:

$$\sigma_{из} = \epsilon_d \cdot E_l, \quad (14)$$

где ϵ_d – относительная деформация верхних волокон ленты.

Так как

$$\epsilon_d = \frac{h_l}{2R + h_l} \cong \frac{h_l}{2R}, \quad (15)$$

то используя эти зависимости, получаем:

$$T = S_2 - S_1 = S_1 \frac{e^{f \cdot \alpha_k} - 1}{e^{f \cdot \alpha_k}} - f \cdot \rho_l \cdot h_l \cdot B \cdot R^2 \cdot \omega^2 \cdot \alpha_k - \frac{f \cdot B \cdot h_l \cdot E_l \cdot \alpha_k}{2R}. \quad (16)$$

При скольжении ленты по барабану формула (16) определяет предельное значение силы трения. Естественно, что условием нормальной работы конвейера с одним ведущим барабаном является выполнение соотношения:

$$S_2 - S_1 < T_t, \quad (17)$$

где T_t – сила трения при скольжении ленты.

Следует заметить, что приведенные зависимости справедливы при работе конвейера с неполным скольжением. В таких случаях в формулы подставляется значение коэффициента трения в состоянии относительного покоя. Значение этого коэффициента может быть найдено решением уравнения (16) относительно f .

Так как разница $S_2 - S_1 = T_t$ натяжений ленты в стационарном режиме работы уравновешивает все силы сопротивления ее движению, то можно записать:

$$S_2 - S_1 = \sum_1^n \Delta S_i + S_{x.x}, \quad (18)$$

где ΔS_i – i -е сопротивление движению ленты;

$S_{x.x}$ – сопротивление движению ленты в холостом режиме;

n – число сопротивлений движению.

Сопротивления ΔS_i обычно вычисляются методом обхода конвейера по контуру.

Основная часть суммарного сопротивления движению ленты горизонтального конвейера представляет собой сумму сопротивлений движению роlikоопор. В связи с этим большое внимание уделяется исследованиям конструкций этих опор, снижению сопротивлений их вращению, а также анализу их взаимодействия с конвейерными лентами. Для длинных конвейеров, особенно в горнорудной промышленности, где грузопотоки наиболее значительны, вопросы модернизации конструктивных элементов кон-

вейерного транспорта, повышения их безотказности и долговечности имеют особо важное значение. Не менее важными задачами повышения эффективности ленточных конвейеров является снижение затрат энергии на их приводы как за счет уменьшения суммарного сопротивления движению, так и за счет повышения сцепления ленты с приводными барабанами.

Сумма сил сопротивления движению ленты в рабочем режиме обычно определяется при проектном расчете конвейера в зависимости от его производительности. Если задана объемная производительность Q транспортирования сыпучего (рыхлого) материала, то

$$Q = F \cdot v_{\text{л}}, \quad (19)$$

где F – площадь поперечного сечения потока материала на конвейере;

$v_{\text{л}}$ – скорость движения ленты.

При равномерной загрузке площадь F представляет собой равнобедренный треугольник, площадь которого (рисунок 4):

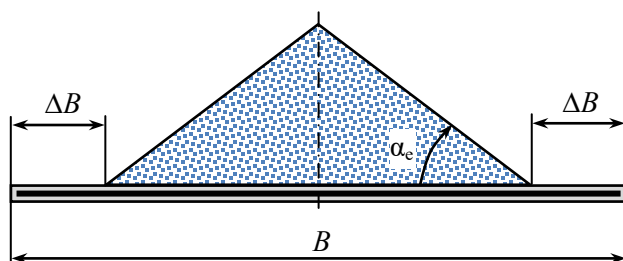


Рисунок 4. – К определению площади F поперечного сечения материала на ленте

$$F = \frac{1}{4} (B - 2\Delta B)^2 \operatorname{tg} \alpha_e, \quad (20)$$

где α_e – угол естественного откоса материала;

ΔB – запас ленты по ширине.

Скорость ленты зависит от угловой скорости ω вращения ведущего барабана, его диаметра и величины буксования ленты:

$$v_{\text{л}} = \omega \cdot R (1 - \varepsilon_6), \quad (21)$$

где R – радиус приводного барабана;

ε_6 – коэффициент буксования, $\varepsilon_6 = v_c / (\omega \cdot R)$;

v_c – скорость скольжения ленты относительно барабана.

Для определения коэффициента буксования в работе [11] рекомендуется формула:

$$\varepsilon_6 = \frac{K_v \cdot \varphi_c}{K_v \cdot \varphi_c + \sqrt{1 - \varphi_c^2}}, \quad (22)$$

где K_v – коэффициент пропорциональности между относительными скоростями поперечных деформаций ленты и барабана.

Коэффициент сцепления ленты с барабаном:

$$\varphi_c = \frac{S_2 - S_1}{T_{\text{т}}}. \quad (23)$$

Коэффициент K_v требует проведения специальных экспериментов по его определению. В первом приближении он может быть оценен выражением [9]:

$$K_v = S_1 \frac{e^{f \cdot \alpha_k} - 1}{R^2 \cdot \alpha_k^2 \cdot e^{f \cdot \alpha_k}} \sqrt[3]{B \cdot R^2 \cdot \alpha_k^2} \frac{\mu_{\text{л}}}{E_{\text{л}} \cdot h_{\text{л}}}, \quad (24)$$

где $\mu_{\text{л}}$ – коэффициент Пуассона материала ленты.

Последнее соотношение указывает на зависимость коэффициентов K_v и φ_c от нагруженности конвейера, которая зависит от массы $m_{\text{м}}$ материала на конвейере:

$$m_m = \rho \cdot Q \frac{L_k}{v_l}, \quad (25)$$

где ρ – плотность материала на конвейере;

L_k – длина рабочей ветви конвейера.

Тогда

$$\sum \Delta S_i = c \cdot m_m \cdot g, \quad (26)$$

где c – коэффициент, характеризующий величину сопротивления перемещению материала конвейером.

Учитывая последнее выражение, имеем:

$$T = S_{x.x} + c \cdot \rho \cdot g \cdot L_k \frac{1}{4} (B - 2\Delta B)^2 \operatorname{tg} \alpha_e. \quad (27)$$

Отсюда необходимое значение ширины ленты:

$$B = 2 \left(\Delta B + \sqrt{\frac{T - S_{x.x}}{c \cdot \rho \cdot g \cdot L_k \cdot \operatorname{tg} \alpha_e}} \right) \quad (28)$$

или

$$B = 2\Delta B + \sqrt{\frac{Q}{v_l \cdot \operatorname{tg} \alpha_e}}.$$

Последнее выражение можно использовать, задавшись скоростью ленты, предельное значение которой ограничивается опытными данными, приведенными в нормативных документах, и стандартными значениями ширины B_p ремней плоскоремennых передач. Скорость ленты уточняется после этого делением производительности Q на площадь F .

Однако такая методика определения ширины и скорости движения ленты конвейера не учитывает затрат мощности на скольжение ленты относительно поверхности барабана. Величина скорости v_c скольжения ленты относительно барабана:

$$v_c = \omega \cdot R \cdot \varepsilon_6, \quad (29)$$

где ε_6 – выражается с помощью коэффициентов K_v и φ_c , которые зависят от нагрузки, передаваемой барабаном ленте.

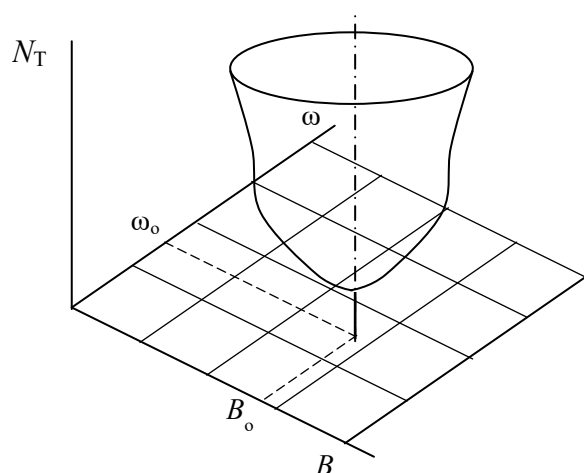
В связи с этим возникает задача определения таких значений T и v_c , при которых обеспечивается минимум функции $N_T = T \cdot v_c$, где N_T – мощность силы трения ленты о ведущий барабан. При этом на значения T и v_c накладывается единственное ограничение, заключающееся в обеспечении условия $Q = \text{const}$.

Целевая функция этой задачи:

$$\Phi(B, v_l) = (S_1 - S_2) \omega \cdot R \cdot \varepsilon_6 \rightarrow \min. \quad (30)$$

Сюда входят также угловая скорость ω и радиус R ведущего барабана, которые также можно варьировать при нахождении минимума целевой функции Φ . В настоящей работе будем считать, что R и α_k определены. Тогда:

$$\Phi = \left(S_{x.x} + \frac{1}{4} \rho \cdot g \cdot c \cdot l_k (B - 2\Delta B)^2 \operatorname{tg} \alpha_k \right) \omega \cdot R \cdot \varepsilon_6. \quad (31)$$



$f_c = 0,5$; $L_k = 10$; $\alpha_k = 3,14$; $\alpha_c = 40^\circ$;
 $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$; $c = 0,2$; $S_{x,x} = 200 \text{ Н}$
 Рисунок 5. – Оптимальные B_0 и ω_0

Для нахождения минимума целевой функции классическими методами необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\Phi}{d\omega} = 0; \\ \frac{d\Phi}{dB} = 0. \end{cases} \quad (32)$$

Поскольку вычисление производных в данном случае затруднительно, то целесообразно воспользоваться численными методами оптимизации. Один из вариантов решения задачи приведен на рисунке 5.

Заключение. Рассмотренный в работе процесс взаимодействия конвейерной ленты с барабаном и пример

формулировки и решения задачи оптимизации при обосновании конструктивных и режимных параметров конвейера, конечно, не охватывает всех задач, которые можно сформулировать при анализе конструкций и режимов работы ленточных конвейеров. Вместе с тем, считаем необходимым заметить, что подобные задачи можно сформулировать и для механизмов, которые в практике очень широко распространены и, на первый взгляд, изучены со всех сторон. Приведенный пример показывает, что известное утверждение «Совершенству нет предела» справедливо и для технических систем горной промышленности. Надеемся, что и далее технические системы будут модернизироваться с самых разных точек зрения.

Список использованных источников

1. Спиваковский, А.О. Ленточный конвейер / А.О. Спиваковский // Горная энциклопедия: в 5 т. Том 3: Кенган-Орт / Под ред. Е.А. Козловского. – М.: Советская энциклопедия, 1987. – 592 с.
2. Спиваковский, А.О. Теория ленточных конвейеров / А.О. Спиваковский, В.Г. Дмитриев. – М.: Наука, 1982. – 191 с.
3. Лубенец, Н.А. Прямой метод определения коэффициента трения ленты о барабан / Н.А. Лубенец // Научный вестник НГУ. – 2010. – № 11-12. – С. 27-31.
4. Федоров, С.В. Теория ременных передач с учетом уравнения энергетического баланса трения / С.В. Федоров, Д.В. Афанасьев // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – С. 892-895.
5. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин [и др.]. – М.: Горная книга, 2011. – 545 с.
6. Пожелко, В.И. Силовые закономерности упругодеформируемой ременной передачи / В.И. Пожелко // Известия Челябинского научного центра РАН. – 2000. – Вып. 3. – С. 56-62.
7. Скойбеда, А.Т. Ременные передачи / А.Т. Скойбеда. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 383 с.
8. Станько, Д.Г. К вопросу теории ременной передачи / Д.Г. Станько // Известия Томского политехнического института. – 1951. – Т. 68, вып. 1. – С. 317-337.

9. Казаченко, Г.В. Передача трением усилий со стороны барабана (шкива) на ленту конвейера (ремня). Часть 1. Моделирование взаимодействия ленты с барабаном / Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 78-85.

10. Шаповалов, В.И. Анализ конструкций узлов натяжения ленты в двухприводных ленточных конвейерах / В.И. Шаповалов, Е.В. Борис, А.П. Дворник // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 48-55.

11. Казаченко, Г.В. Взаимодействие опорных площадок ходовых устройств мобильных машин с несущим основанием / Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 50-55.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

УДК 622.661.832

Вишняк Б.А., Сереброва Т.В., Колунтаев И.В., Хныкин А.Г.*Группа компаний КАНЕКС, г. Москва, Россия***ТЕХНОЛОГИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
СОВРЕМЕННОЙ КАЛИЙНОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ**

Аннотация. Предложена комплексная модель современной калийной флотационной фабрики, воедино связывающая передовые направления технологии обогащения и автоматизации процессов. Определены критерии и сформулированы задачи управления каждого технологического передела, разработана и предложена структура общей автоматизированной системы управления технологическими процессами. Показано, что современная калийная фабрика – это автоматизированный высокотехнологичный комплекс по переработке сильвинитовой руды.

Ключевые слова: технология обогащения, автоматизированное управление, технологическая схема, калийная фабрика, измельчение, флотация, оборудование, система контроля и управления.

Vishnyak B.A., Serebrova T.V., Koluntaev I.V., Khnykin A.G.*KANEX Group of Companies, Moscow, Russia***TECHNOLOGY AND AUTOMATED PROCESS CONTROL
OF A MODERN POTASH PROCESSING PLANT**

Abstract. A complex model of a modern potash flotation plant is proposed, which connects the advanced areas of dressing technology and process automation. Criteria are defined and management tasks for each technological conversion are formulated. The structure of the General automated process control system is developed and proposed. It is shown that a modern potash factory is an automated high-tech complex for processing silvinit ore.

Keywords: dressing technology, automated control, technological scheme, potash factory, grinding, flotation, equipment, control and management system.

Введение. Основным направлением в технологии процессов современной калийной обогатительной фабрики является получение высококачественных удобрений с минимальными потерями полезного вещества и высокими технико-экономическими показателями.

Выпуск удобрений с улучшенными физико-химическими свойствами обусловлен потребностями сельского хозяйства, экономикой производства и повышенным спросом на мировом рынке.

Совершенствование технологии обогащения калийных руд за счет разработки и внедрения более отработанных технологических схем, нового высокопроизводительного и эффективного оборудования, реагентных режимов, полной автоматизации производственных процессов в настоящее время актуально и востребовано [1]. Актуальность совершенствования технологии обогащения обусловлена еще и необходимостью разработки и освоения новых калийных месторождений Узбекистана, Казахстана и Туркмении по выпуску конкурентоспособных калийных удобрений для обеспечения собственных и мировых рынков [2]. С этой целью нами разработана и предложена ориентировочная модель современной калийной флотационной фабрики, воедино связывающая передовые направления технологии и автоматизированного управления процессами.

Технология обогащения и автоматизация процессов современной калийной флотационной фабрики разработаны на основе многолетних научно-исследовательских ра-

ния операций измельчения и поверочной классификации обеспечивается обратным маточным раствором. Оптимальная (флотационная) крупность измельчения определяется степенью раскрытия зерен сильвина от галита, флотационной активностью реагентов и эффективностью применяемого флотационного оборудования.

Подрешетные продукты предварительной и поверочной классификации, разбавленные маточным раствором, направляются на операцию первой стадии обесшламливания.

Целью обесшламливания является снижение массовой доли нерастворимого остатка (н.о.) в суспензии, поступающей на флотацию.

Первая стадия обесшламливания проводится в гидроциклоне 25. Слив гидроциклона при крупности твердой фазы менее $0,15 \pm 0,25$ мм направляется на операцию второй стадии обесшламливания.

Вторая стадия обесшламливания проводится в гидросепараторе 26, где при определенной расчетной и экспериментальной скорости восходящего потока выделяются в слив тонкие минеральные зерна, представленные, в основном, нерастворимым остатком с примесью галита и сильвина.

Слив гидросепаратора направляется на операцию сгущения 28. Пески гидроциклона первой стадии обесшламливания и пески гидросепаратора второй стадии обесшламливания являются питанием сильвиновой флотации.

В схеме применен принцип отдельного кондиционирования питания сильвиновой флотации, состоящего из крупной (песков гидроциклона) и тонкой (песков гидросепаратора) фракций, с реагентом-депрессором [6]. В качестве депрессора применяются крахмалсодержащие продукты. Реагентом-собирателем обрабатываются только пески гидроциклона первой стадии обесшламливания. В качестве собирателя применяются высокомолекулярные алифатические амины (катионный собиратель) с добавлением жидких парафинов (аполярный собиратель). Пенообразователем является сосновое масло. Кондиционирование песков гидроциклона первой стадии обесшламливания осуществляется последовательно в контактных чанах 32, 33, кондиционирование песков гидросепаратора депрессором – в контактном чане 34. Пески гидросепараторов после обработки депрессором поступают во вторую камеру флотационной машины основной сильвиновой флотации.

Операция основной и контрольной флотации осуществляется в механических флотационных машинах кипящего слоя (ФМ-6,3 КСМ). Технологическая схема сильвиновой флотации включает в себя основную 35, контрольную 36 флотацию и перечистную операцию 38 в пневматических (пневмоэжекторных) флотомашинах allflot компаний Allmineral и KANEX Group. Предлагаемые флотомашины отличаются простотой управления, низкими капитальными и эксплуатационными затратами, высокой производительностью, большой высотой пенного слоя и системой его промывки, позволяющей получать концентрат более высокого качества.

Камерный продукт контрольной флотации (хвосты флотации) классифицируется в гидроциклоне 39. Слив гидроциклона поступает на операцию сгущения в сгустителе Ц-30 (поз. 41).

Пенный продукт перечистой флотации направляется на операцию растворения (выщелачивания) части содержащегося в продукте хлорида натрия в целях получения кондиционного по массовой доле хлорида калия сильвинового концентрата (поз. 47). В качестве растворяющего агента (выщелачивающего раствора) используются промывные воды систем пылегазоулавливания отделения сушки и гранулирования. Для данной операции могут быть применены обычные камеры флотационной машины ФКМ-6,3. Однако, более целесообразным следует считать применение машины выщелачивания (одна на каждую секцию) специальной конструкции на базе турбинного или пропеллерно-винтового ротора.

После операции выщелачивания флотоконцентрат, разбавленный маточным раствором, классифицируется в гидроциклоне 48. Слив гидроциклона сгущается флотацией во флотационной машине 49. Камерный продукт флотационного сгущения направляется в баки чистого маточника, а пенный продукт и пески гидроциклона классификации концентрата направляются на обезвоживание.

Шламовая суспензия (слив гидросепаратора II стадии обесшламливания) из баков насосом перекачивается в шламовый сгуститель 28. Для увеличения скорости осаждения шламов применяется раствор флокулянта. Слив сгустителя шламов является осветленным оборотным маточным раствором, направляемым в технологический процесс обогащения. Пески сгустителя при соотношении $Ж:Т = 1,5 \div 1,6$ разбавляются оборотным рассолом и удаляются в шламохранилище.

Разгрузка хвостового сгустителя 41 через зумпф 42 насосом направляется в бак-смеситель 40, где смешивается с песками гидроциклона 39. Полученная суспензия направляется для обезвоживания на ленточный вакуум-фильтр 44, а затем на закладку. Количество хвостов, содержание в них массовой доли КСІ, влажность хвостов оцениваются по показаниям приборов, установленных на ленточном дозаторе-формирователе 45 слоя, необходимого для измерения вышеуказанных параметров.

Пенный продукт флотосгущения (поз. 49) и пески гидроциклона 48 через бак-сборник пульпы концентрата 50 направляются на фильтрование на центрифугу или ленточный вакуум-фильтр 51. Решение по применению обезвоживающего оборудования принимается после проведения экспериментальных научно-исследовательских работ по флотации, перечистным операциям и фильтрованию флотоконцентрата. Качество кека концентрата, его расход и влажность оцениваются по показаниям приборов, установленных на сформировавшем слой дозаторе-формирователе 54. Для достижения кондиционного содержания КСІ в кеке осадок дополнительно промывается выщелачивающим раствором, для снижения влажности обрабатывается паром. Кек концентрата после вакуум-фильтра подается на сушку в сушильный барабан или аппарат «КС» 58 (уточняется на стадии проектирования). Высушенный концентрат обрабатывается реагентом-антислеживателем и пылеподавателем в шнековом барабане-смесителе 62, а затем направляется на склад готовой продукции или погрузку. Часть концентрата после сушки направляется на грануляцию.

При необходимости постоянного выпуска гранулированных удобрений целесообразно разделить потоки мелкой и крупной фракций хлористого калия на отдельные потоки на стадии обезвоживания с дальнейшей подсушкой потока мелкой фракции и постоянной транспортировкой его в цех грануляции с подмешиванием сухой пыли, удаляемой из сушильных аппаратов.

Основными производителями технологического оборудования являются российские, белорусские и зарубежные компании [6-9].

К основным преимуществам предлагаемой технологической схемы применительно к современной флотационной калийной фабрике относятся:

1. Принципиально новая, менее энергоемкая технологическая схема перечистой флотации за счет пневматических аппаратов, обладающих лучшей селективностью разделения сильвина от галита в высоком пенном слое и обеспечивающих повышение технологических показателей.
2. Гидросепараторы с центральным приводом и автоматизированным поддержанием степени разжижения разгрузки.
3. Металлические сгустители с центральным приводом и большой цилиндрической высотой в комплекте с автоматизацией принудительной выгрузки сгущенного

шлама, обеспечивающей постоянную степень разжижения и снижение потерь ценного компонента за счет интенсивности процесса сгущения шламовых отходов (уменьшения объемов сбрасываемого в шламохранилище маточного раствора и снижения средств на капитальное строительство шламохранилищ). Переход от железобетонных конструкций сгустителей на металлические обусловлен снижением затрат на капитальные ремонты, а также при необходимости повышения производительности за счет возможности наращивания цилиндрических чаш сгустителей.

4. Высокопроизводительные ленточные вакуум-фильтры с пропаркой кека и автоматизированным приводом для изменения скорости движения ленты, обеспечивающие снижение влажности осадка.

Автоматизированное управление процессами рассматривается и разрабатывается комплексно с технологической схемой с учетом высоких требований автоматизации к технологии, и технологии к автоматизации. Автоматический контроль и управление процессами обогащения сильвинитовой руды на калийной фабрике рекомендуется осуществлять на базе высокоточных современных средств автоматического контроля и управления с использованием промышленных ПЭВМ и микропроцессорных контроллеров в рамках автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП) по оптимально разработанным алгоритмам. Управление должно осуществляться по критерию: минимизация суммарных приведенных затрат на единицу выпускаемой продукции. В нашем случае, общая задача управления будет заключаться в обеспечении переработки всего поступающего на фабрику количества руды для получения калийного концентрата заданного качества и в заданном количестве при минимальных экономических затратах на получение единицы продукции.

Решение общей задачи обеспечивается последовательным решением задач на каждом из переделов посредством локальных АСУТП, объединенных в общую АСУТП КТП, которая объединяет технологические переделы и управляет всем комплексом процессов в целом, затем в фабричную сеть MES-системы для оперативно-диспетчерского управления производством и далее в ERP-систему управления предприятием.

На рисунке 2 представлена функциональная схема автоматизированного управления комплексом процессов рудоподготовки и обогащения (начало – окончание) современной калийной флотационной фабрики.

При автоматизации технологических переделов большое значение на флотофабрике должно отводиться рудоподготовке как с точки зрения технологии, так и ее управления. Основной задачей управления процессами рудоподготовки является обеспечение переработки (дробления) всей поступающей с рудника руды до кондиционного по крупности класса и стабилизация качества дробленной руды по содержанию массовой доли KCl. Стабилизация входных параметров качества и количества руды на фабрику улучшает в целом работу всех последующих переделов и позволяет получить значительный эффект за счет повышения извлечения, уменьшения расхода реагентов и электроэнергии. Решение поставленной задачи обеспечивается локальной АСУТП отделения дробления и усреднения (АСУТП ДУ). Регулирование (стабилизация) количества (17, 27) и качества (18, 28) руды, подаваемой на измельчение, обеспечивается по алгоритмам усреднения [10] руды на складе и изменения потоков руды на фабрику, на склад и со склада посредством изменения (8, 9) положения секторных шиберов распределительной камеры, программного управления (10) штабелеукладчиком конусного складирования и заданным управлением (12) работой кратцер-крана. Качество (6, 18, 28) дробленной руды измеряется непосредственно на лентах дозаторов, сформировавших потоки для измерения, радиоактивным методом на базе гамма или бета-зонда [11].

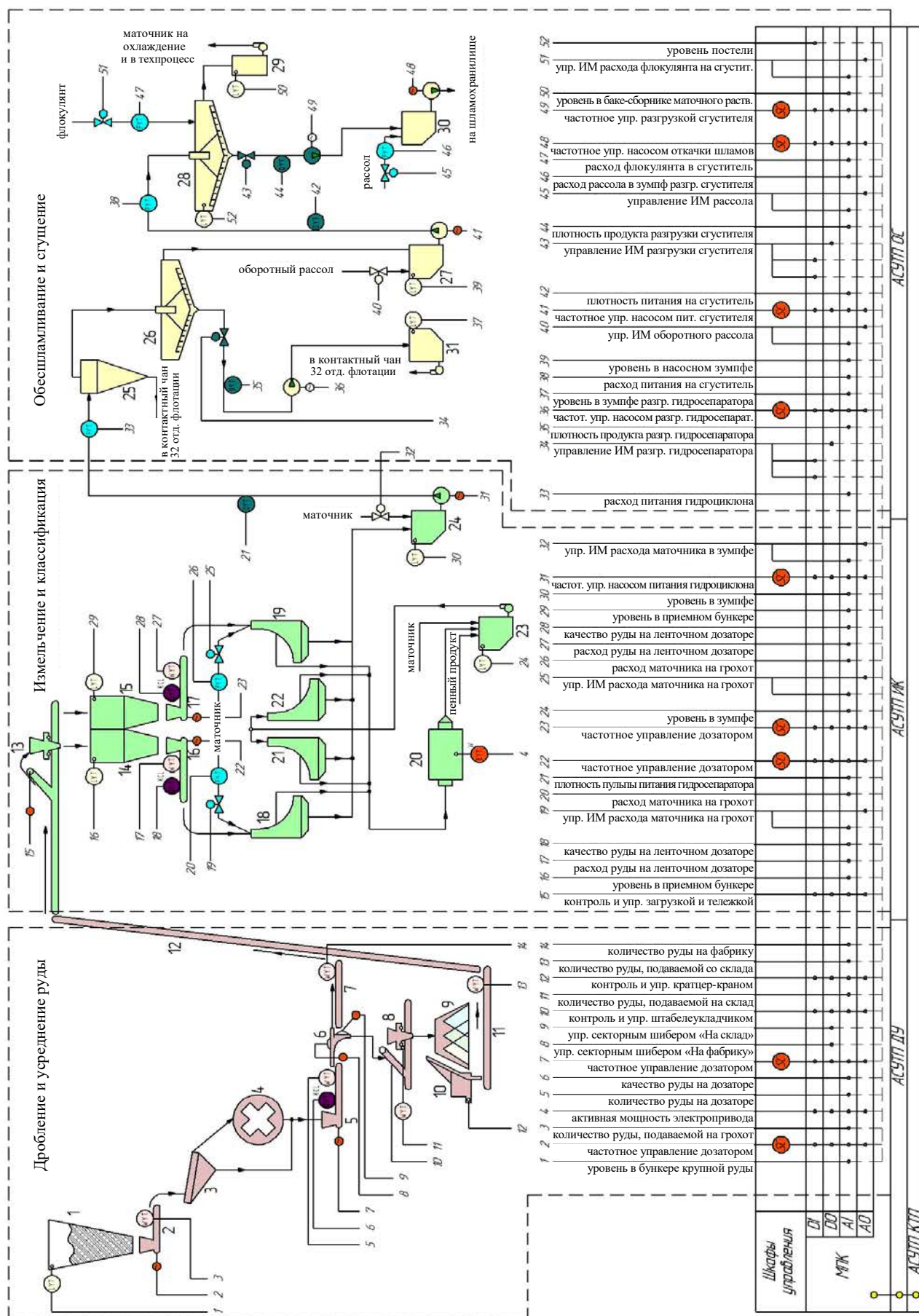


Рисунок 2. – Функциональная схема автоматизированного управления комплексом процессов рудоподготовки и обогащения современной калийной флотационной фабрики (начало)

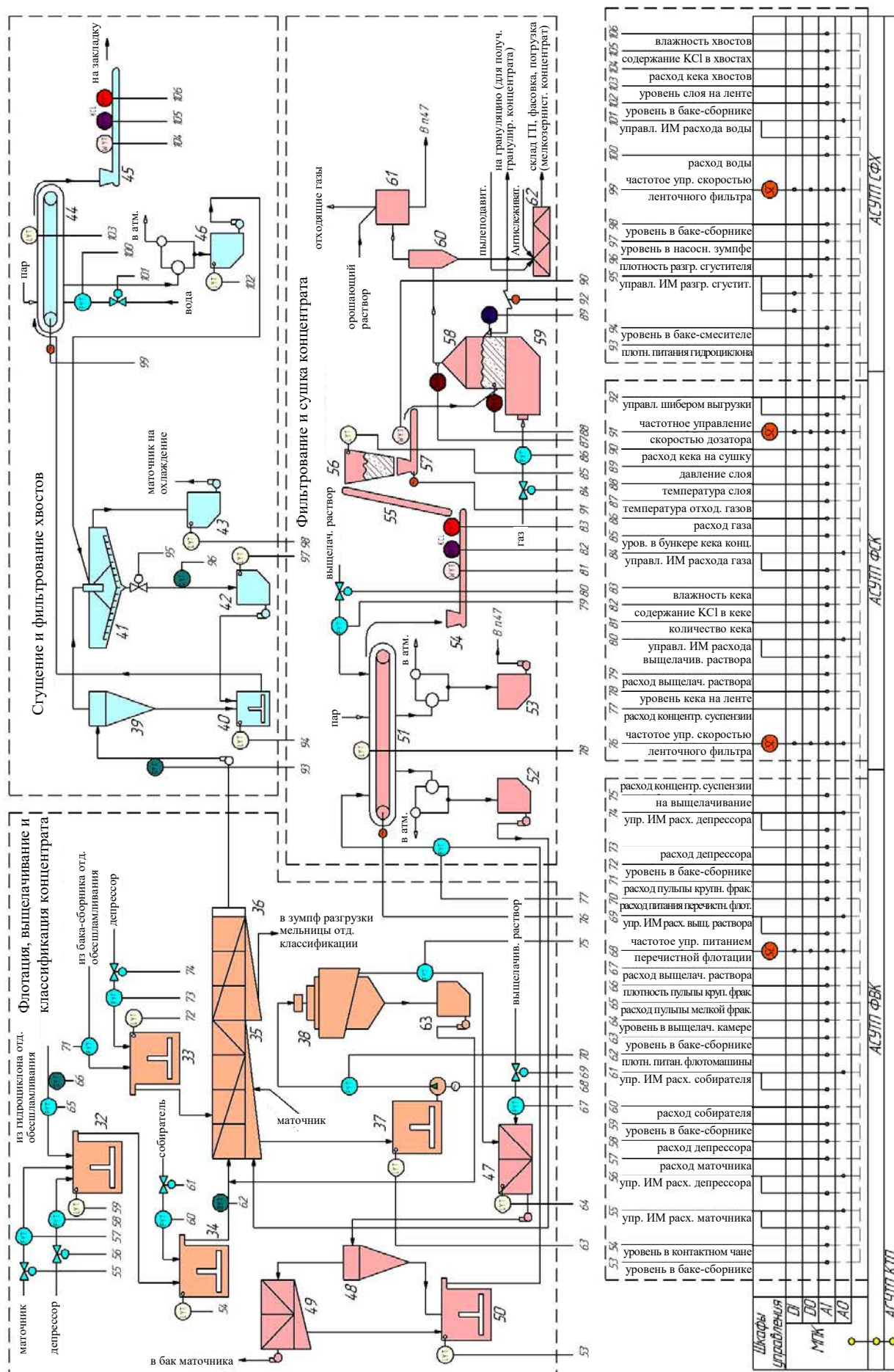


Рисунок 2. – Функциональная схема автоматизированного управления комплексом процессов рудоподготовки и обогащения современной калийной флотационной фабрики (окончание)

Основной задачей управления процессом измельчения является максимизация содержания кондиционных классов в продукте, направляемом на флотацию, при заданной производительности. Решение данной задачи обеспечивается АСУТП отделения измельчения и классификации (АСУТП ИК) регулированием (стабилизацией) питания мельницы путем изменения скорости ленты каждого из дозаторов мельницы посредством частотного управления (22, 23).

Плотность питания мельницы регулируется (стабилизируется) по соотношению «расход руды – расход маточного раствора» воздействием на расход маточника (19, 25).

Контроль стержневой загрузки в мельнице оценивается величиной активной составляющей мощности (4) электропривода мельницы [12].

Многочисленными исследованиями [13] доказано, что мощность привода зависит только от стержневой загрузки мельницы и не зависит от ее рудной нагрузки. Это справедливо только для стержневых мельниц с центральной разгрузкой. По активной мощности электропривода определяется стержневая загрузка. Каждой стержневой загрузке соответствует оптимальная рудная нагрузка. Следовательно, каждому значению активной мощности электропривода должна соответствовать своя оптимальная рудная нагрузка. Оптимальное соотношение рудной нагрузки и стержневой загрузки обеспечивает максимальный выход кондиционного класса в продукте после мельницы, снижает циркуляционные потоки и уменьшает расход электроэнергии.

Основной задачей управления процессом обесшламливания является более полное отделение песковой фракции гидроциклона от нерастворимого остатка на первой стадии обесшламливания и минимум потерь KCl со шламовым продуктом в сливе гидросепаратора на второй стадии обесшламливания. Решение поставленной задачи в предлагаемой концепции управления обеспечивается локальной АСУТП обесшламливания и сгущения шламов (АСУТП ОС) путем регулирования (стабилизации) питания по плотности (21) изменением расхода маточника (32) в поз. 24 и производительности (33) посредством частотного управления (31) насосом с поз. 24. Регулирование плотности разгрузки (35) гидросепаратора, измеряемой радиоизотопным плотномером фирмы RGI, обеспечивается изменением количества выгружаемого материала частотным управлением (36) насосом разгрузки.

Основной задачей управления процессом сгущения шламов является минимум потерь хлористого калия с жидкой фазой при откачке шламов на шламохранилище [10]. Решение поставленной задачи обеспечивается путем стабилизации расхода питания (38) на сгуститель посредством частотного управления (41) насосом, регулирования соотношения расходов питания грязного маточника (38) и флокулянта (47) с коррекцией по уровню (52) постели в сгустителе, регулирования (стабилизации) плотности разгрузки сгущенного продукта (44) (шламов) также посредством частотного управления (49) насосом разгрузки.

Флотация является одним из основных технологических переделов при производстве хлористого калия. Критерием управления процессом флотации является минимум потерь KCl с хвостами при заданных значениях содержания KCl в концентрате и заданной производительности. Зависимость «содержание KCl в хвостах – расход реагентов» имеет экстремальный характер. Минимуму содержания KCl в хвостах будет соответствовать и максимум извлечения в концентрат, и высокое качество продукта [14, 15]. Решение поставленных задач обеспечивается локальной АСУТП флотации, выщелачивания и классификации концентрата (АСУТП ФВК) по алгоритмам управления путем изменения (56, 74) расхода (58, 73) реагента-депрессора для отдельного кондиционирования крупной и мелкой фракций, распределяемых в 1-ую и 2-ую камеры основной флотации в зависимости от расхода и плотности пульпы, поступающей с песками гид-

роциклона (65, 66) и продуктом разгрузки гидросепаратора (71, 35). Расход собирателя (амин) (60) изменяется (61) по расходу (65, 71) и плотности пульпы (62) питания флотации. Содержание KCl в камерном продукте после флотации измерить каким-либо прибором не представляется возможным. Единственной точкой измерения содержания KCl в хвостах является ленточный дозатор-формирователь слоя (поз. 45), установленный после хвостового ленточного вакуум-фильтра. Он обеспечивает все условия для измерения потерь KCl (105) радиоактивным методом на базе гамма или бета-зонда. Несмотря на некоторую удаленность места измерения этого параметра, эта информация является важной и может служить основным корректирующим сигналом на управление процессом флотации изменением расхода реагентов. Для построения АСУТП ФВК рекомендованы системы технического зрения типа VisioFloth фирмы Metso Minerals или Floth Master фирмы Outotek. Промышленные видеокамеры, установленные непосредственно над пенным слоем, позволяют измерять скорость движения, цвет и слой пены, размер ее пузырьков – это параметры, которые косвенно характеризуют процесс флотации. Для измерения расхода реагентов рекомендуется использовать расходомеры AXF фирмы Yokogawa или Promag фирмы Endress+Hauser, в качестве плотномеров – систему измерения плотности DD50 с блоком обработки информации Decon 21 фирмы RGI [16].

На перемешивающей флотации важным является измерение расхода питания (70) и его регулирование (стабилизация) частотным управлением (68) насосом питания. При частотном управлении рекомендуется использовать частотные преобразователи фирмы АВВ.

Управление процессом выщелачивания осуществляется по соотношению расходов концентратной суспензии (75) и выщелачивающего раствора (67).

Управление процессами фильтрования и сушки концентрата осуществляется в рамках локальной АСУТП ФСК по алгоритмам управления [16], обеспечивающим переработку всей поступающей на фильтрование концентратной суспензии (77) до минимальной влажности (83) осадка на ленте вакуум-фильтра изменением скорости ленты посредством частотного управления (76) и минимальным расходом топлива (86). Минимум расхода топлива обеспечивается стабилизацией давления (89) в слое изменением подачи материала (90) в аппарат путем изменения скорости ленты дозатора частотным управлением (91), поддержанием температуры в слое (88) или же температуры отходящих газов (87) воздействием на расход топлива (84) и автоматической выгрузкой (92) готового концентрата.

Влажность (81, 82, 83) кека концентрата, его количество и качество определяются комплексной информационно-измерительной системой на базе микроволнового зонда Z20209 фирмы Franz-Ludwig и гамма или бета-зонда фирмы RGI, установленной на ленте формирователя слоя. Окончательное (заданное) качество кека концентрата обеспечивается подачей (80) выщелачивающего раствора на вакуум-фильтр в зависимости от расхода кека (81) и содержания KCl (82) в нем [10, 16].

Управление сгущением и фильтрованием хвостов осуществляется в рамках локальной АСУТП СФХ по критерию: минимум потерь KCl с жидкой фазой (маточным раствором), то есть минимумом влажности осадка (106) на ленте вакуум-фильтра, что обеспечивается изменением скорости (99) движения ленты. Влажность осадка (106) на ленте вакуум-фильтра, его расход (104), содержание KCl в осадке определяется комплексной ИИС, аналогичной ИИС на концентратном вакуум-фильтре.

Таким образом, автоматизированное управление отдельными технологическими переделами посредством локальных АСУТП увязывается в одну общую АСУТП КТП, которая объединяет технологические переделы и управляет всем комплексом процессов в целом, обеспечивая при этом решение общей задачи по переработке всего коли-

чества руды, поступающей на обогащение при минимальных удельных затратах и заданном качестве готового продукта.

Заключение. Обобщая изложенный материал, можно сделать следующее заключение.

1. На основе многолетних научно-исследовательских работ, опыта работ калийных обогатительных фабрик, сравнительного анализа технологического оборудования, средств и систем автоматизации от различных производителей разработана и представлена ориентировочная модель современной калийной флотационной фабрики, воедино связывающая передовые направления технологии обогащения и автоматизированного управления процессами.

2. Предложена технологическая схема современной калийной флотационной фабрики с применением как традиционного оборудования, используемого в калийной отрасли, так и вновь внедряемого и осваиваемого современного оборудования.

3. Определены критерии и задачи управления каждого технологического передела, разработана и представлена функциональная схема автоматизации процессов, разработана и предложена структура комплексной АСУТП, обеспечивающая реализацию алгоритмов управления по каждому переделу и в целом по всей фабрике. Показано, что современная калийная фабрика – это высокотехнологичный автоматизированный комплекс по переработке руды.

Список использованных источников

1. Тетерина, Н.Н. Технология флотационного обогащения калийных руд / Н.Н. Тетерина, Р.Х. Сабиров, Л.Я. Сквирский. – Соликамск, 2002. – 482 с.
2. Поздеев, А.А. Проекты ООО «ЗУМК-Инжиниринг» в освоении калийных месторождений стран СНГ / А.А. Поздеев, А.Н. Земсков // Технология ведения горных работ и производство техники для горнодобывающей промышленности: сб. тр. / ГП ЗУМК, ООО «ЗУМК-Инжиниринг». – Вып. 4. – Пермь, 2009. – С. 6-10.
3. Технология и автоматизация производства калийных удобрений / Р.С. Пермяков [и др.]. – Л.: «Химия», 1973. – 160 с.
4. Титков, С.Н. Обогащение калийных руд / С.Н. Титков, А.И. Мамедов, Е.И. Соловьев. – М.: Недра, 1982. – 216 с.
5. Поляков, А.Е. Разработка технологии высококачественных калийных удобрений флотационным и комбинированным способами: автореф. ... дис. канд. наук: 05.17.01. / А.Е. Поляков; БТИ им. С.М. Кирова. – Минск, 1983 – 18 с.
6. Результаты исследовательских работ по совершенствованию флотационного способа обогащения калийных руд Старобинского месторождения / М.Р. Турко [и др.] // Совершенствование процессов обогащения калийной промышленности: сб. научн. тр. ВНИИГ. – Л., 1974.
7. Разумов, К.А. Проектирование обогатительных фабрик / К.А. Разумов. – М.: Недра, 1970. – 581 с.
8. Нормы технологического проектирования предприятий калийной и соляной промышленности. Часть 2. Флотационные и галургические обогатительные солефабрики. – Минск, 1996. – 232 с.
9. Абрамов, А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учеб. для вузов: в 3 т. / ред. совет: Л.А. Пучков [и др.]. – М.: МГГУ, 2004-2005. – 3 т.
10. Вишняк, Б.А. Автоматизированное управление процессами усреднения качества руды, сгущения шламов, выщелачивания концентрата и сушки готового продукта

на сильвинитовых обогатительных фабриках РУП «ПО «Беларуськалий» / Б.А. Вишняк // Технология ведения горных работ и производство машин и механизмов для горнодобывающей промышленности: сб. тр. / ГП ЗУМК, ООО «ЗУМК-Инжиниринг». – Вып. 3. – Пермь, 2007. – С. 121-139.

11. Головков, Б.Ю. Системы и средства автоматизации обогатительных фабрик / Б.Ю. Головков, Л.А. Рейбман, Г.Г. Колпиков. – М.: Недра, 1990. – 232 с.

12. Левчишин, Ю.И. Контроль стержневой загрузки мельниц / Ю.И. Левчишин, Н.И. Кузьмин // Разработка автоматизированных систем управления технологическими процессами калийных фабрик: сб. ВНИИГ. – Вып. 69. – Л., 1975.

13. Результаты технологического опробования цикла измельчения СОФ 1 РУ РУП «ПО «Беларуськалий»: отчет ВНИИГ, 1972.

14. Олейников, В.А. Автоматическое управление технологическими процессами в обогатительной промышленности / В.А. Олейников, О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1966. – 291 с.

15. Василенко, А.А. Анализ и синтез систем автоматического дозирования реагентов на сильвинитовых обогатительных фабриках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 / А.А. Василенко; Санкт-Петербург. гор. ин-т им. Г.В. Плеханова. – СПб., 1992. – 20 с.

16. Вишняк, Б.А. Технология обогащения и автоматизация процессов калийных флотационных фабрик / Б.А. Вишняк, А.А. Поздеев, М.Р. Турко. – Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2011. – 240 с.

Информация об авторах

Вишняк Борис Андреевич – кандидат технических наук, руководитель направления технологии обогащения и автоматизации процессов БЕ «КАНЕКС ТЕХНОЛОГИЯ» Группы компаний КАНЕКС (ул. 2-я Звенигородская, 13/37, г. Москва, Россия), e-mail: terbel@tut.by, vba@kanexgroup.ru.

Сереброва Татьяна Владимировна – руководитель направления БЕ «КАНЕКС ТЕХНОЛОГИЯ» Группы компаний КАНЕКС (ул. 2-я Звенигородская, 13/37, г. Москва, Россия), e-mail: t.serebrova@kanexgroup.ru.

Колунтаев Илья Валерьевич – коммерческий директор БЕ «КАНЕКС ТЕХНОЛОГИЯ» Группы компаний КАНЕКС (ул. 2-я Звенигородская, 13/37, г. Москва, Россия), e-mail: kiv@kanex-t.ru.

Хныкин Александр Геннадьевич – генеральный директор БЕ «КАНЕКС ТЕХНОЛОГИЯ» Группы компаний КАНЕКС (ул. 2-я Звенигородская, 13/37, г. Москва, Россия), e-mail: AGKhnykin@kanex-t.ru.

Information about the authors

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

Serebrova Tatyana Vladimirovna – Head the Course of the KANEX Group of Companies, (13/37, 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow, Russia), e-mail: t.serebrova@kanexgroup.ru.

Koluntaev Ilya Valerievich – commercial manager of the KANEX Group of Companies, (13/37, 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow, Russia), e-mail: kiv@kanex-t.ru.

Khnykin Alexandr Gennadievich – General Director of the KANEX Group of Companies, (13/37, 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow, Russia), e-mail: AGKhnykin@kanex-t.ru.

Поступила в редакцию 10.12.2020 г.

УДК 629.01:629.03

Моисеенко В.Л., Дмитриев А.В., Максимчик К.В., Письменная Н.В.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ГИБРИДНЫЙ ПРИВОД НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения гибридного привода на железнодорожном транспорте. Представлены виды гибридного привода. Рассмотрены варианты применения гибридного привода на тепловозах и специальном подвижном составе, а также состояние гибридного привода в специальном подвижном составе в Республике Беларусь.

Ключевые слова: гибридный привод, двигатель внутреннего сгорания, электродвигатель, тепловоз, специальный подвижной состав.

Moiseenko V.L., Dmitriev A.V., Maksimchyk K.V., Pismennaya N.V.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***HYBRID DRIVE ON RAILWAY TRANSPORT**

Abstract. The article deals with the issues of using a hybrid drive in railway transport. The types of hybrid drive are presented. Variants of using a hybrid drive on diesel locomotives and special rolling stock are considered, as well as the state of the hybrid drive in a special rolling stock in Belarus.

Keywords: hybrid drive, internal combustion engine, electric motor, locomotive, special rolling stock.

Введение. Ресурсы нашей планеты не бесконечны, и для дальнейшего существования человечества требуются большой запас энергонесущего сырья, в том числе, нефти, из которой изготавливают нефтепродукты и топливо для автомобилей.

Двигатели внутреннего сгорания, применяемые на транспорте, в процессе своей работы выделяют большое количество вредных веществ (окиси углерода и азота), загрязняющих атмосферу.

Все это привело к созданию гибридного привода для различных машин и механизмов, в том числе и на железнодорожном транспорте.

Гибридным называют привод, содержащий не менее двух различных силовых установок. В основном это сочетание двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя, позволяющее максимально использовать их преимущества, при этом компенсируя имеющиеся недостатки [1-3].

Главное достоинство двигателя внутреннего сгорания и его использования в большинстве транспортных средств заключено в запасе движения по топливу. Запас хода достигается благодаря большой концентрации энергии в применяемом топливе. Обратной стороной медали является достаточно высокий уровень шума и большой выброс различных вредных веществ, а также способность эксплуатации только в одном интервале скоростей, что заставляет дополнительно применять такие устройства как сцепление и трансмиссию. КПД двигателя внутреннего сгорания сравнительно низок и составляет порядка 20-40 %, что влечет значительное повышение вредных выбросов при отклонении от равномерного движения.

Электродвигатель имеет существенно выше КПД (80-90 %), не выделяет вредных выбросов, практически не производит шума и с момента своего запуска способен создавать крутящий момент.

Однако у электрического двигателя, на сегодняшний момент, есть ряд ограничений по его применению, а именно, ограниченное количество существующих аккумуляторов, касательно их веса, размеров и стоимости, пригодных к практическому применению для наземного транспорта.

Виды гибридного привода. Развитие гибридного привода осуществляют в двух основных направлениях [4]:

1 – равноправное объединение двигателя внутреннего сгорания с электродвигателем (так называемые полные гибриды);

2 – оснащение двигателя внутреннего сгорания вспомогательным электродвигателем (неполные гибриды).

Первое направление активно развивается в области автотранспортных средств, однако пока не нашло развития на железной дороге из-за необходимости применения габаритных и тяжелых аккумуляторных батарей.

Второе направление развивается более успешно ведущими производителями железнодорожной техники. Имеется два основных варианта конструкций неполных гибридов:

- параллельное сочетание двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя (параллельные гибриды);

- последовательное размещение двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя (последовательные гибриды).

При «параллельном» сочетании источников энергии электродвигатель используют как дополнение к дизельному двигателю. Совместное функционирование дизельного и электрического двигателей в составе гибридного привода позволяет каждому источнику энергии работать в оптимальном режиме, дополняя друг друга при различных условиях эксплуатации. Электродвигатель практически мгновенно дает дополнительную мощность, не расходуя топливо и не загрязняя окружающую среду.

Выпускаемые машины с параллельным расположением источников энергии имеют тяговые электродвигатели (ЭД) постоянного тока. В конструкции этих машин использованы двигатель внутреннего сгорания (ДВС), а также следующие электрические компоненты:

- электрический агрегат, способный работать в режимах генератора и двигателя (мотор-генератор (М-Г));

- инвертор (преобразователь переменного тока в постоянный, т.е. трансформатор (Тр));

- аккумуляторная батарея (АБ) (конденсатор);

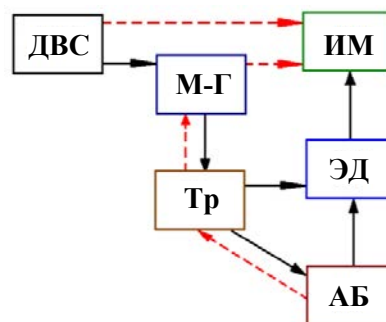
- электродвигатель постоянного тока.

На рисунке 1 представлена структурная схема параллельного гибрида и показаны два основных режима его работы:

1 – режим работы мотор-генератора как генератора отражен на структурной схеме сплошной линией: ДВС – М-Г – Тр – АБ – ЭД – ИМ;

2 – режим работы мотор-генератора как электродвигателя отражен на схеме пунктиром: АБ – Тр – М-Г – ИМ + ДВС – ИМ.

При «последовательном» сочетании источников энергии конструкция такого привода обеспечивает последовательный переход механической энергии двигателя внутреннего сгорания в электрическую энергию генератора и затем обратно в механи-



ИМ – исполнительный механизм

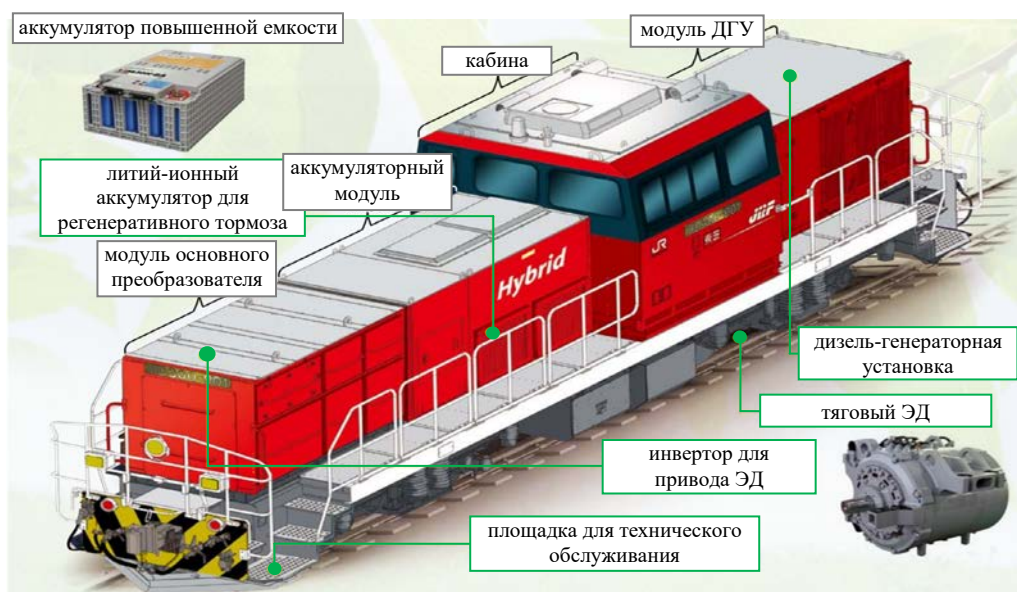
Рисунок 1. – Структурная схема гибридного привода с параллельным расположением источников энергии

ческую при помощи электродвигателя, т.е. первичный двигатель приводит электродвигатель без обратной силовой связи, как в параллельных гибридах. Между тем, такие неполные гибриды находят все более широкое применение, поскольку существенно упрощают трансмиссионные передачи по сравнению с механическими аналогами.

Применение гибридного привода на тепловозах. JR Freight Class HD300 является гибридным дизельным/аккумуляторным колесным тепловозом типа 2o-2o, эксплуатируемым Japan Freight Railway Company (JR Freight) в Японии [5]. После поставки и оценки опытного локомотива в марте 2010 года, первый серийный локомотив был введен в эксплуатацию в феврале 2012 года.

В локомотиве используются литий-ионные аккумуляторы, и они предназначены для снижения выбросов выхлопных газов как минимум на 30-40 % и уровня шума не менее, чем на 10 дБ по сравнению с существующими тепловозами класса DE10. Испытания, проведенные на Токийском грузовом терминале в июне 2010 года, показали экономию топлива на 36 %, сокращение выбросов NO_x на 62 % и снижение уровня шума на 22 дБ по сравнению с локомотивом класса DE10. Внешне локомотивы выполнены в ярко-красной ливрее, чтобы улучшить видимость, с желтыми и черными диагональными полосами предупреждения на концах.

Первый серийный локомотив HD300-1, поставленный в январе 2012 года, хотя и в целом идентичный прототипу локомотива HD300-901, включает в себя несколько незначительных улучшений: изменения в фарах, более широкая передняя панель предупреждения для уменьшения образования снега на ступеньках, увеличенные окна в дверях кабины для улучшения видимости. На рисунке 2 представлена схема расположения основных механизмов локомотива.



ДГУ – дизель-генераторная установка

Рисунок 2. – Схема расположения основных механизмов локомотива

Используя высокоэффективные литий-ионные аккумуляторы фирмы GS Yuasa Corp, в качестве основного источника движущей силы, Toshiba поставляла маневровые локомотивы, способные работать в гибридном режиме с небольшим двигателем, в Japan Freight Railway Company. Этот гибридный локомотив развивает максимальное тяговое усилие 20 кгс, максимальную мощность 500 кВт и максимальную рабочую скорость 45 км/ч (110 км/ч в транспортном положении).

Локомотив содержит высокоэффективные аккумуляторные батареи большой мощности, выходная мощность которых может обеспечить перевозку 1300 т, что позволяет уменьшить размер двигателя. PMSM используется в качестве двигателя, направленного на повышение эффективности. С конструктивной точки зрения, модульная концепция была использована для упрощения технического обслуживания, а также для обеспечения возможности быстрой установки аккумуляторных батарей более высокой производительности.

Гибридная система состоит из дизельного двигателя и аккумулятора большой емкости в качестве источника питания. В типе HD300 используется гибридная система серии, в которой электрическая энергия с двумя источниками обеспечивает тяговую мощность для тяговых двигателей, полученную из энергии на основе масла, вырабатываемой двигателем, и от аккумулятора.

В режиме ускорения (рисунок 3) оптимизация источника питания может быть автоматически достигнута между режимами, включающими как батарею, так и мощность генератора или только батарею.

В режиме замедления (торможения) (рисунок 4) тормозная мощность, создаваемая тяговыми двигателями, работающими в качестве генераторов, может заряжать аккумулятор (АКБ) путем преобразования кинетической энергии в электрическую энергию.

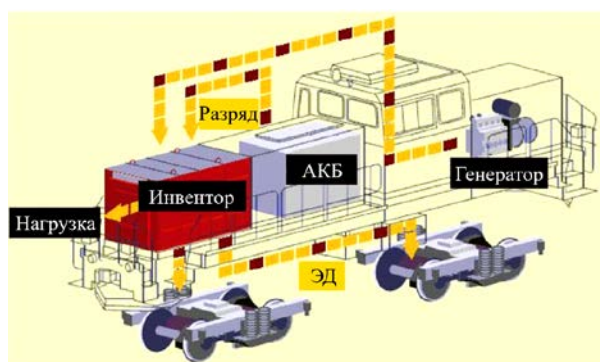


Рисунок 3. – Режим ускорения

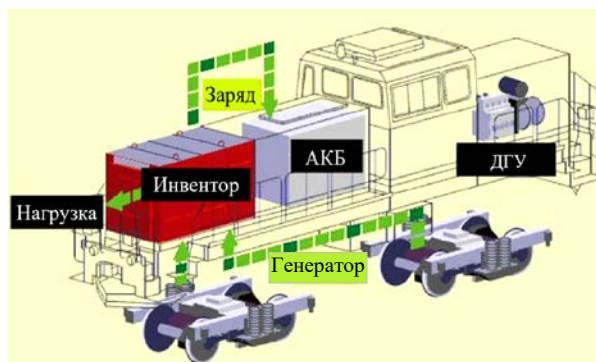


Рисунок 4. – Режим замедления (торможения)

Маневрово-вывозной тепловоз с гибридным тяговым приводом ТЭМ-9Н «SinaraHybrid» отличается от обычного дизельного тепловоза тем, что помимо дизельного двигателя на нем установлен генератор, электроприводы и накопители энергии. Новый тепловоз оснащен асинхронными тяговыми приводами. В нем применены активные накопители энергии, а именно литий-железо-фосфатные аккумуляторы и суперконденсаторы для рекуперации и хранения электрической энергии. Также была реализована уникальная система, управляющая созданием и распределением запасов электроэнергии, хранящейся в накопителе, разработаны алгоритмы управления силовыми IGBT транзисторами тягового преобразователя частоты, обеспечивающие снижение тепловыделения, что позволило изготовить преобразователь с воздушным охлаждением, разработано программное обеспечение и инновационная интеллектуальная микропроцессорная система для управления и диагностики гибридного асинхронного привода.

Конструкция тепловоза «SinaraHybrid» [6] имеет модульную архитектуру производства (рисунок 5). На раме тепловоза размещены дизель-генераторный, кабинный, санитарно-бытовой модули, а также модуль подготовки сжатого воздуха, отсек чистого воздуха, модуль преобразователей и накопителей энергии.

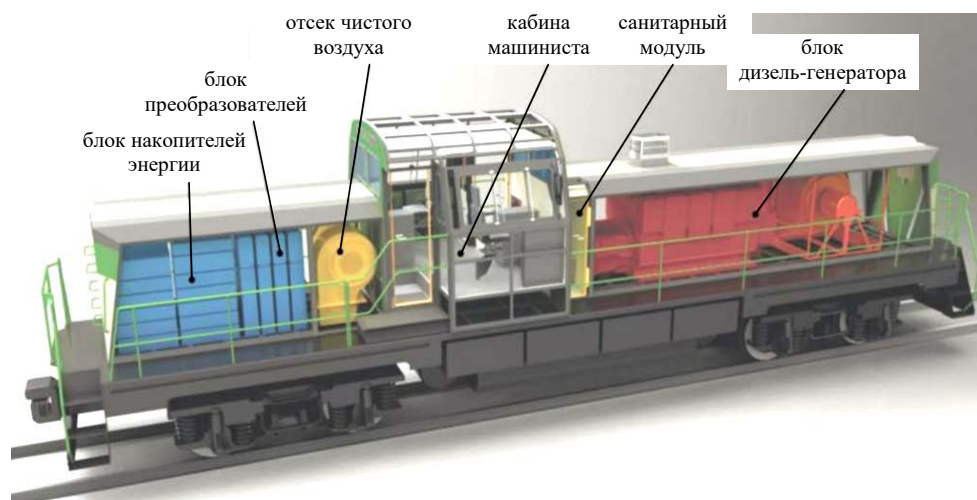


Рисунок 5. – Конструкция тепловоза ТЭМ-9Н «SinaraHybrid»

Электрическая схема локомотива предусматривает наличие в конструкции литий-железо-фосфатных аккумуляторов и суперконденсаторов для хранения электрической энергии. Локомотив имеет асинхронный тяговый привод с векторным регулированием вращающего момента на валу двигателей, который является собственной разработкой Центра инновационного развития СТМ. Колесно-моторные блоки выполнены с применением моторно-осевых подшипников качения фирмы «Timken».

На тепловозе применены компоненты, которые позволяют существенно увеличить межремонтные сроки, а в некоторых случаях исключить отдельные виды ремонтов.

Так, в конструкции тепловоза применены инновационные высокопрочные колесные бандажи Нижнетагильского металлургического комбината. Трубопроводы воздушных систем локомотива выполнены из нержавеющей стали с фитинговыми соединениями без применения сварки, что обеспечивает высокую надежность работы тормозного оборудования и его ремонтпригодность. В системе подготовки сжатого воздуха установлен высокоэффективный винтовой компрессор с пониженными показателями по шумности и вибрации.

У нового тепловоза «SinaraHybrid» суммарной мощностью 1200 л.с., в сравнении с его аналогом по мощности дизель-генератора моделью ТЭМ9, на 30 % будет снижен расход дизельного топлива, до 55 % уменьшатся показатели выбросов отработанных газов в окружающую среду. Это соответствует современным зарубежным стандартам по экологии.

При создании тепловоза с гибридным приводом было реализовано более 20 новейших технических решений. Так, алгоритмы интеллектуального управления локомотивом для микропроцессорной системы разработаны конструкторами Центра инновационного развития СТМ. Микропроцессорная система управления и диагностики гибридного локомотива, обладающая функцией предсказания профиля пути с использованием технологий ГЛОНАСС, позволяет заранее оптимально планировать расход энергетических ресурсов в процессе движения.

Применение гибридного привода в специальном подвижном составе. Машина Plasser & Theurer UNIMAT 09-4x4/4S E³ предназначена для технического обслуживания путей, использует как электрическую энергию от контактного провода, так и дизель-генераторную установку для питания рабочего привода [7].

Plasser & Theurer UNIMAT 09-4x4/4S E³ (рисунок 6) использует электрическую энергию от воздушной линии не только для электрической тяги во время движения, а

также для питания блоков трамбовки. Если на участке отсутствует воздушная линия, машина использует дизель-электрический генератор.



Рисунок 6. – Plasser & Theurer UNIMAT 09-4x4/4S E³

Plasser & Theurer UMMAT 09-4x4/4S E³ питается от высоковольтной линии 15 кВ/16,7 Гц через высоковольтный модуль, трансформатор, два силовых преобразователя, электрический тяговый двигатель и, в конечном счете, механическое фрикционное соединение, к колесу и рельсу.

Работа машины от линии электропередач осуществляется следующим образом. При контакте токоприемника и ЛЭП напряжение поступает на высоковольтный модуль, после чего переходит на трансформатор. После трансформатора напряжение подается на преобразователь питания, который, в свою очередь, подает напряжение на электродвигатели, приводящие в движение машину.

Работа машины от дизель-генераторной установки осуществляется следующим образом: в результате возгорания сжатого дизтоплива образуется энергия расширения газов. В процессе переработки этой энергии с помощью кривошипно-шатунного механизма появляется механическая энергия вращения коленчатого вала. Вал через муфту соединен с ротором генератора. При вращении ротора возбуждается электромагнитное поле, в результате чего создается электродвижущая сила (ЭДС). ЭДС создает исходящее напряжение. Это напряжение, стабилизируемое с помощью устройства управления, подается

на электродвигатели, которые приводят в движение машину. На рисунке 7 представлен привод Plasser & Theurer UNIMAT 09-4x4/4S E³.

Plasser & Theurer HTW 100 E³ (рисунок 8) – это специальный подвижной состав с питанием от воздушной линии и гибридным приводом. Поскольку воздушная линия отсутствует при использовании этих ма-

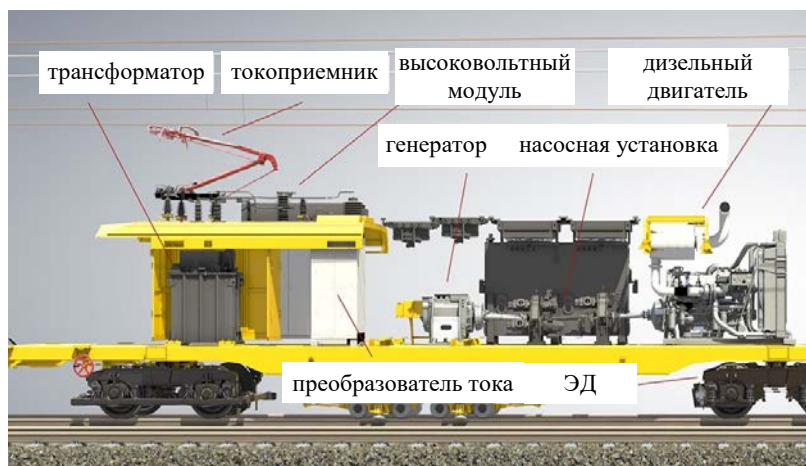


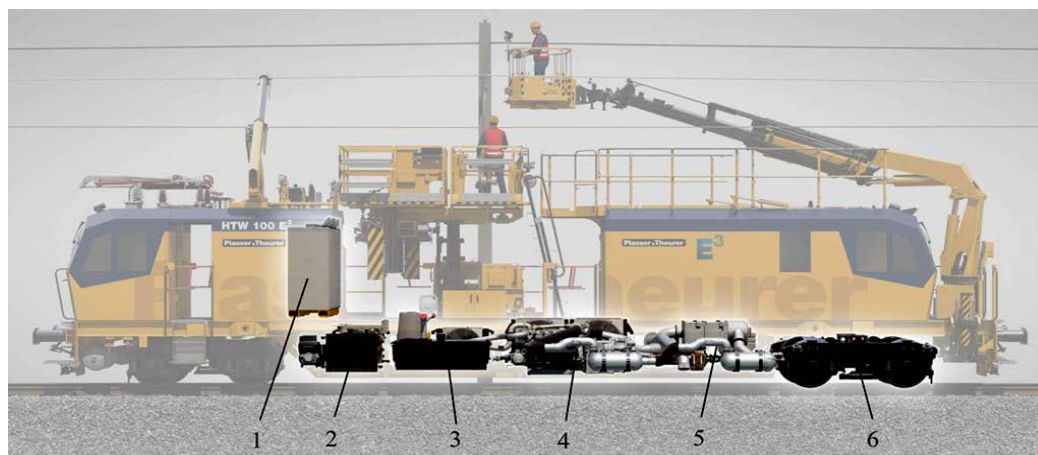
Рисунок 7. – Привод Plasser & Theurer UNIMAT 09-4x4/4S E³

шин на определенных участках, машину HTW 100 E³ оснастили новейшей аккумуляторной батареей. Во время работы машина является энергосберегающей, тихой и не выделяет вредных веществ. Технология аккумуляторов была проверена на практике. Батареи работают даже дольше, чем две шестичасовые смены, на которые они рассчитаны. Они заряжаются через рекуперацию энергии во время торможения, от внешнего источника питания или с помощью дизельного генератора.



Рисунок 8. – Plasser & Theurer HTW 100 E³

Гибридный привод HTW 100 E³ (рисунок 9) для работы с воздушной линии электропередачи перемещается в рабочем режиме с использованием новейших аккумуляторных батарей. Эта комбинация приводов обеспечивает огромные преимущества для работ в системе воздушных линий в туннелях и городских районах. Шум и выхлопные газы больше не являются проблемой.



**1 – трансформатор; 2 – компрессор; 3 – насосная установка;
4 – дизельный силовой агрегат; 5 – генератор; 6 – приводная тележка**
Рисунок 9. – Гибридный привод Plasser & Theurer HTW 100 E³

HTW 100 E³ работает на литий-ионной батарее. Это значительно повышает комфорт работы на платформах во время выполнения работ, так как снижается уровень шума и выхлопных газов. Система привода батареи не вызывает местных выбросов.

По сравнению с машинами для замены и установки контактных сетей с обычными приводами HTW 100 E³ снижает уровень шума, создаваемого при работе в воз-

душной линии, более чем на 20 дБА. Иногда персонал, разговаривающий на рабочих платформах, издает самый громкий шум из машины.

Даже когда машина перемещается из одной точки работы в другую, НТВ почти не создает шума. По сравнению с другими машинами с дизельным приводом система электропривода E^3 снижает уровень шума более чем на 10 дБА.

В рабочем режиме работающий от батареи НТВ 100 E^3 не превышает уровень шума 80 дБА, что является предельным значением воздействия, требующим использования средств защиты органов слуха. Даже при запуске НТВ излучает примерно на 15 дБА меньше, чем машины с дизельным двигателем серии МТВ.

Новая технология привода позволяет значительно снизить скорость вращения в режиме холостого хода, когда рабочий орган поднят. Его скорость увеличивается только во время реальной работы – проникновения и сжатия. Когда скорость вращения блока уменьшается, электрическая энергия восстанавливается.

Состояние гибридного привода в специальном подвижном составе в Республике Беларусь. В настоящее время на железной дороге в Республике Беларусь не наблюдается использование гибридного привода в специальном подвижном составе. Но так как в стране интенсивным ходом идет электрификация магистральных железнодорожных линий, возникает необходимость в машинах с гибридным приводом, т.к. они обладают большими преимуществами перед обычными машинами с двигателем внутреннего сгорания.

Заключение. Основные преимущества применения гибридного привода заложены в больших возможностях при достижении требуемых технических характеристик. Достижимо это стало благодаря новым технологиям, получившим развитие в последние 10-20 лет. Кроме этого, гибридные приводы обладают следующими дополнительными преимуществами.

1. Экономичность и снижение количества выбросов вредных веществ. Применение электропривода позволяет обеспечить снижение расхода топлива и, соответственно, выбросов вредных веществ на 30 % и более в сравнении с традиционными механическими системами.

2. Компонировочные преимущества. Отсутствие жестких кинематических связей элементов трансмиссии позволяет их применять без значительного изменения существующей компоновки машины.

3. Увеличение пробега без участия ДВС. Наличие на борту накопителя энергии помимо существенного увеличения экономических и динамических характеристик транспортного средства позволяет обеспечить пробег с выключенной или вышедшей из строя энергетической установкой.

4. Увеличенное полезное пространство. За счет использования электромеханической трансмиссии машина освобождается от компонентов системы привода, в котором размещались механические детали.

5. Возможность автоматизации. По своей сути привод электротрансмиссии является полностью автоматическим. Все воздействия машиниста на органы управления машины преобразуются в электрические сигналы системы управления.

6. Ремонтопригодность. Достигается благодаря модульности конструкции, которой обладает электропривод, и отсутствию механической связи энергетической установки и колес, что является классическим примером гибридного привода.

7. Режим «электростанция». Энергетическая установка машины имеет возможность обеспечения внешних потребителей электроэнергией, эквивалентной мощности энергетической установки, что позволяет использовать машину как миниэлектростанцию.

Следует отметить, что использование гибридных установок повышает стоимость машин на 20-25 %, тем не менее, за счет упомянутых технико-экономических показателей первоначальные финансовые вложения быстро окупаются в период эксплуатации.

Список использованных источников

1. Красневский, Л.Г. Технологии гибридных силовых установок – перспективные технологии производства автомобильной техники / Л.Г. Красневский // Перспективные технологии: монография / А.В. Алифанов [и др.]; под ред. В.В. Клубовича. – Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2011. – Гл. 8. – С. 166-186.
2. Power output apparatus and hybrid vehicle: Patent No. US 7,938,208 B2 / B60K6/44 / Hidehiro Oba, Aichi-ken (JP), Yukihiko Ideshio, Susono (JP); Assignee: Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha. – Appl. No.12/446,711; Date of Patent: May 10, 2011. – 27 p.
3. Electric hybrid powertrain system: Patent No. US 7,572,201 B2 / F16H3/72; B60K6/42 / Joseph Supina, Belleville, MI (US), Shailesh Kozarekar, Novi, MI (US); Assignee: Ford Global Technologies, LLC. – Appl. No.11/470,361; Date of Patent: Aug. 11, 2009. – 21 p.
4. Довгяло, В.А. Дорожно-строительные машины: учеб. пособие: в 2 ч. / В.А. Довгяло, Д.И. Бочкарев. – Гомель: БелГУТ, 2010-2014. – Ч. 2: Машины для устройства и ремонта дорожных покрытий / В.А. Довгяло, Д.И. Бочкарев. – 2014. – 385 с.
5. Официальный сайт Japan Freight Railway Company [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jrfreight.co.jp/en>. – Дата доступа: 06.08.2020.
6. Официальный сайт машиностроительного холдинга Синара-Транспортные Машины [Электронный ресурс]. – Екатеринбург, 2016-2020. – Режим доступа: <https://sinaratm.ru>. – Дата доступа: 07.08.2020.
7. Официальный сайт Plasser & Theurer [Электронный ресурс]. – Австрия. – Режим доступа: <https://www.plassertheurer.com>. – Дата доступа: 08.08.2020.

Информация об авторах

Моисеенко Владимир Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

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

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

Письменная Наталья Владимировна – магистр технических наук, аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Information about the authors

Moiseenko Vladimir Leonidovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Dmitriev Anton Vladimirovich – Master’s Student Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Maksimchyk Kiryl Vyachaslavovich – Master’s Student Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Pismennaya Nataliya Vladimirovna – Master of technical sciences, Post-graduate Student “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 30.09.2020 г.

УДК 625.144.5/.7

Довгяло В.А., Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ИМИТАЦИОННОЙ
МОДЕЛИ ЗВЕНОСБОРОЧНОЙ ЛИНИИ КВ03
И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Аннотация. После построения и валидации имитационной модели звеносборочной линии КВ03 необходимо провести компьютерные эксперименты с целью поиска наиболее рациональных изменений технологического процесса работы линии для повышения эффективности ее работы. На основании полученных результатов формируются решения по управлению производственным процессом моделируемой системы.

Ключевые слова: моделирование, сборочная линия КВ03, эксперименты, анализ результатов, принятие решений.

Dovgualo V.A., Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***CONDUCTING EXPERIMENTS ON THE SIMULATION MODEL OF THE
ASSEMBLY LINE KB03 AND ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED**

Abstract. After constructing and validating the simulation model of the KB03 assembly line, it is necessary to conduct computer experiments in order to search for the most rational changes in the technological process of the line operation to increase its efficiency. Based on the results obtained, decisions are formed on the management of the production process of the simulated system.

Keywords: simulation, assembly line KB03, experiments, analysis of results, decision making.

Введение. Для проведения экспериментов на имитационной модели звеносборочной линии (ЗСЛ) КВ03 необходимо установить зависимость выходных параметров линии от входных параметров. Определяющим показателем работы и, следовательно, главным выходным параметром ЗСЛ является ее производительность. Далее необходимо определить главные входные параметры ЗСЛ, влияющие на ее производительность. Поскольку ЗСЛ представляет собой совокупность станков и агрегатов, работающих в полуавтоматическом режиме, часть технологического оборудования управляется операторами. Технологическим процессом предусмотрен ряд операций по сборке путевой решетки, выполняемых вручную. Следовательно, главные факторы, влияющие на производительность ЗСЛ, можно разделить на две большие группы – факторы, зависящие от технической составляющей линии, и человеческий фактор. Поскольку станки и агрегаты ЗСЛ имеют установленные заводские технические характеристики, которые являются неизменными, невозможно повысить производительность сборки путевой решетки за счет внесения изменений в конструкцию агрегатов, а также за счет изменения их технологической последовательности. Однако, повышение надежности технических средств и, как следствие, снижение времени простоя оборудования возможно. Определяющим человеческим фактором, влияющим на производительность ЗСЛ, является квалификация работников, обслуживающих линию. Более высокий квалификационный разряд работника предполагает меньшие затраты времени на выполнение операций и повышение качества результатов работы. Система имитационного моделирования «TecnomatixPlantSimulation», с применением которой была построена имитационная

модель ЗСЛ КБ03, позволят собирать ряд статистических данных по каждому из объектов модели в ходе проведения экспериментов. Сравнение полученных статистических данных позволит проанализировать влияние изменений входных параметров системы ЗСЛ на ее производительность. Для возможности принятия верных и дальновидных решений по оптимизации производства сбор статистических данных для каждого эксперимента будем производить за период имитации, равный одному рабочему году (2008 рабочих часов), в соответствии с [1].

Результаты исследования.

1. Эксперимент по определению зависимости производительности ЗСЛ от квалификационного разряда работников состоит из двух этапов: на первом этапе устанавливается четвертый квалификационный разряд работников, на втором этапе – пятый разряд. Остальные исходные данные – структура имитационной модели и исходные параметры ее объектов – соответствуют параметрам, согласно которым строилась исходная имитационная модель.

На рисунке 1 представлена диаграмма, отображающая значения производительности звеносборочной линии по фактическим нормам, при использовании работников четвертого разряда, при использовании работников пятого разряда.

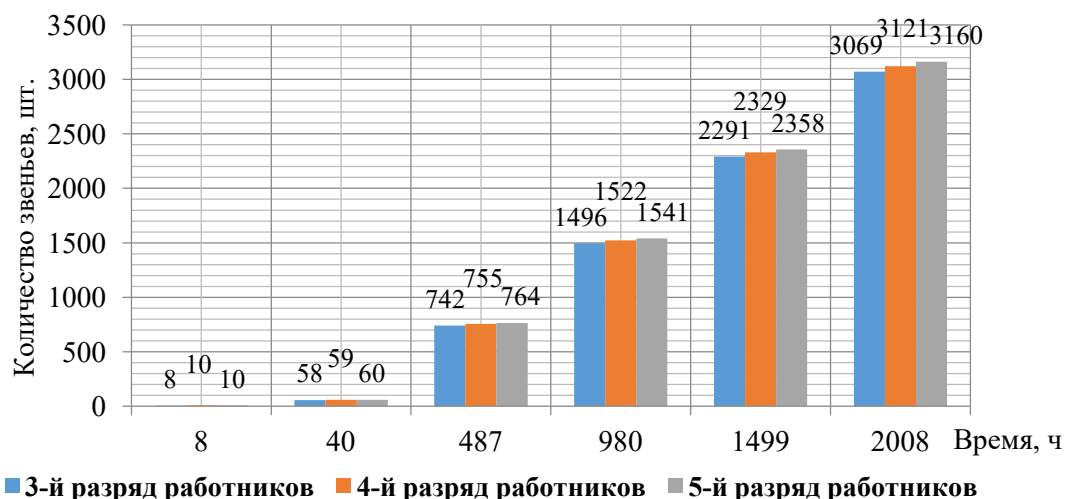


Рисунок 1. – Производительность ЗСЛ по результатам эксперимента

Анализ собранных статистических данных по результатам экспериментов указывает на то, что при повышении квалификации работников, занятых на линии, достигается положительный эффект по ключевым параметрам работы ЗСЛ: производительность сборки путевой решетки увеличивается, загрузка части оборудования увеличивается, загрузка работников (монтеров пути и стропальщиков), выполняющих наиболее тяжелые операции, уменьшается.

2. При сборке путевой решетки на ЗСЛ четыре монтера пути, занятые на участке сборки путевой решетки, помимо выполнения операций по комплектации шпал материалами верхнего строения пути, выполняют дополнительные работы – обрезают изолирующие втулки для стыковых шпал, пополняют элементами скрепления контейеры-накопители, укладывают стыковые накладку на собранное звено. Время на выполнение данных видов работ включается в норму времени на сборку звена и называется оперативным [2]. Использование дополнительных монтеров пути на участке сборки звеньев путевой решетки, которые будут выполнять вышеперечисленные вспомогательные операции, позволит сократить оперативное время, тем самым уменьшить норму времени на сборку звена путевой решетки. Следует отметить, что данное решение по возможности используется на производстве и имеет видимый положительный эффект.

Проведение соответствующего эксперимента позволит установить целесообразность применения данного решения на постоянной или более частой основе. Необходимое и достаточное количество дополнительных монтеров пути – два, так как технологически сборка звена путевой решетки осуществляется с двух сторон от оси звена по торцам шпал, что предусмотрено конструкцией линии. Поскольку работы, включаемые в оперативное время, не требуют высокой квалификации от работников, установим для них третий, минимально допустимый, квалификационный разряд.

На рисунке 2 представлена диаграмма, отображающая значение производительности ЗСЛ по фактическим нормам, при использовании двух дополнительных работников.

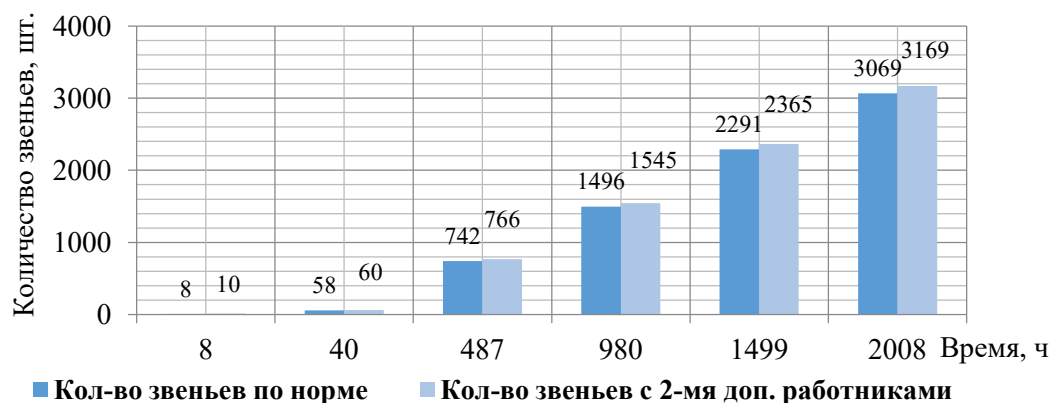


Рисунок 2. – Производительность ЗСЛ по результатам эксперимента

Анализ собранных статистических данных по результатам эксперимента указывает на то, что при использовании на линии двух дополнительных работников достигается положительный эффект по ключевым параметрам работы ЗСЛ. Загрузка оборудования изменяется незначительно, увеличивается загрузка операторов, что означает более эффективное управление закрепленными за ними техническими средствами, загрузка работников (монтеров пути, стропальщиков), выполняющих наиболее тяжелые работы, снижается.

3. Эксплуатация ЗСЛ КБ03 началась в 2012 году. В процессе эксплуатации под влиянием различных факторов происходит изменение свойств, определяющих качество и эффективность функционирования технических средств ЗСЛ, некоторые из технических средств выходили из строя. Все случаи отказов регистрировались в соответствующем журнале на предприятии. Изучение статистики отказов позволило определить наиболее слабые места ЗСЛ и учесть это при построении ее имитационной модели при помощи параметра «вероятность безотказной работы». Проведение и анализ результатов экспериментов на имитационной модели, в которой надежность технических средств ЗСЛ будет 95 % (данный параметр не достигает максимального значения, поскольку всегда остается вероятность внезапного отказа), позволит принять решение о целесообразности затрат времени и ресурсов для повышения фактической надежности технических средств ЗСЛ. В остальном структура имитационной модели и исходные параметры ее объектов соответствуют параметрам, согласно которым строилась исходная имитационная модель.

На рисунке 3 представлена диаграмма, отображающая показатели производительности ЗСЛ по фактическим нормам, при вероятности безотказной работы технических средств 95 %.

Анализ собранных статистических данных по результатам эксперимента указывает на то, что при повышении вероятности безотказной работы технических средств до 95 % производительность ЗСЛ, загрузка оборудования не меняются. Положительный эффект достигается за счет снижения загрузки стропальщиков, занятых на линии.

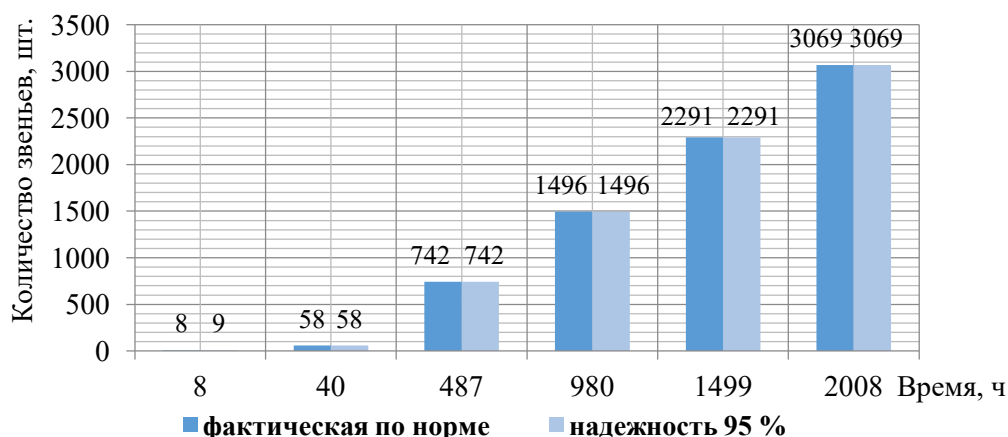


Рисунок 3. – Производительность ЗСЛ по результатам эксперимента

4. Для определения максимальной производительности ЗСЛ необходимо провести эксперимент, в исходных данных которого будут учтены наиболее оптимальные условия, повышающие производительность сборки на линии, установленные в предыдущих экспериментах. Так, имитацию производственного процесса на модели будем производить при условии, что на линии используются работники (монтеры пути, стропальщики) пятого квалификационного разряда, к работам привлечены два дополнительных работника (монтеры пути третьего квалификационного разряда), надежность технических средств составляет 95 %.

На рисунке 4 представлена диаграмма, отображающая показатели производительности ЗСЛ по фактическим нормам, при оптимальных условиях.

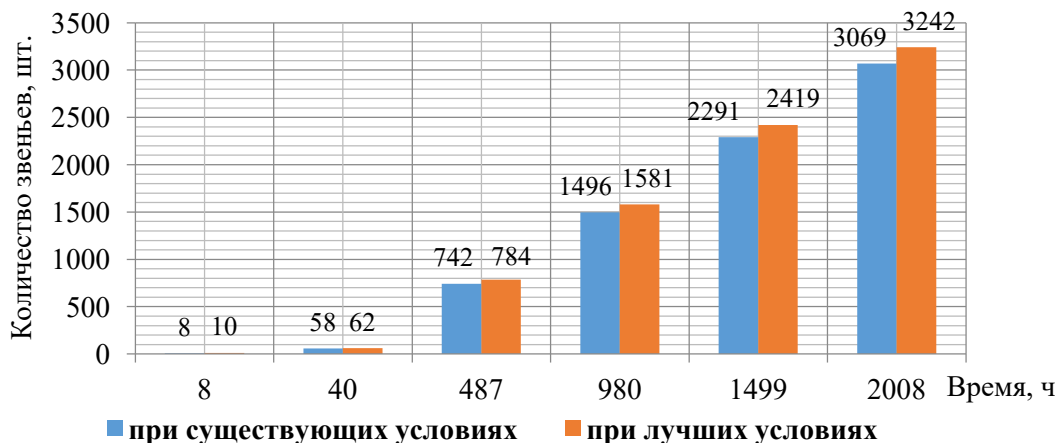


Рисунок 4. – Производительность ЗСЛ по результатам эксперимента

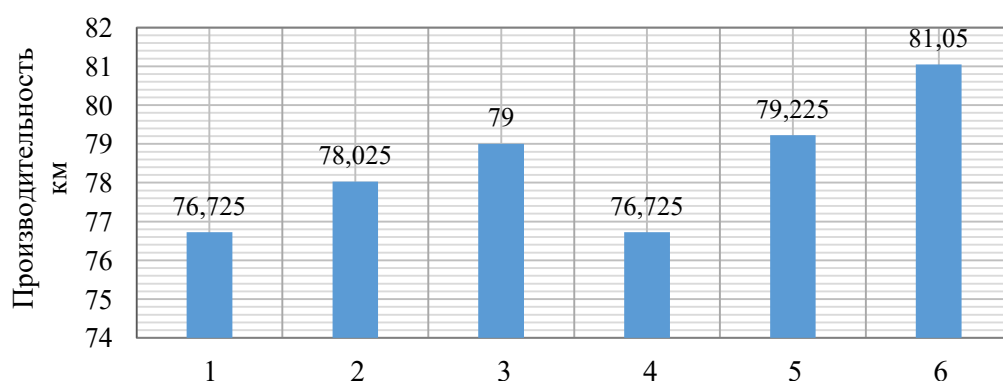
Анализ собранных статистических данных по результатам эксперимента указывает на то, что при оптимальных условиях достигается значительный положительный эффект: производительность сборки путевой решетки на линии увеличивается, при этом снижается нагрузка работников (монтеров пути, стропальщиков), выполняющих наиболее тяжелые операции, время на выполнение ручных операций уменьшается, нагрузка части оборудования увеличивается.

Значения производительности ЗСЛ согласно проведенным экспериментам приведены в сводной таблице.

График производительности ЗСЛ по результатам экспериментов представлен на рисунке 5.

Таблица. – Производительность ЗСЛ

Наименование эксперимента	Производительность		Отношение к производительности при фактических условиях	
	звеньев	км	км	%
при фактических условиях	3069	76,725	-	-
при использовании работников 4 квалификационного разряда	3121	78,025	+ 1,3	+ 1,69
при использовании работников 5 квалификационного разряда	3160	79	+ 2,275	+ 2,97
при надежности технических средств 95 %	3069	76,725	0	0
при использовании двух дополнительных работников	3169	79,225	+ 2,5	+ 3,26
при оптимальных условиях	3242	81,05	+ 4,325	+ 5,64



1 – при фактических условиях; 2 – при использовании работников 4 разряда; 3 – при использовании работников 5 разряда; 4 – при надежности технических средств 95 %; 5 – при использовании 2 дополнительных работников; 6 – при оптимальных условиях

Рисунки 5. – Производительность ЗСЛ

Заключение. При увеличении квалификации работников (монтеров пути, стропальщиков), занятых на ЗСЛ, производительность сборки путевой решетки увеличивается за годовой период относительно фактической на 1,69 % и 2,97 % при использовании работников четвертого и пятого квалификационного разрядов соответственно. При использовании на ЗСЛ двух дополнительных работников (монтеров пути третьего квалификационного разряда) производительность сборки путевой решетки за годовой период относительно фактической увеличивается на 3,26 %. При повышении вероятности безотказной работы технических средств до 95 % производительность сборки за годовой период не изменяется. Это обусловлено тем, что эксплуатация ЗСЛ соответствует этапу нормальной эксплуатации. Несмотря на отсутствие роста производительности сборки путевой решетки при увеличении надежности технических средств, следует обратить внимание на «проблемные места» ЗСЛ – платформы, станок для сборки креплений «СБ-3». Проведение дополнительного технического обслуживания данных элементов снизит вероятность их внезапных отказов и, как следствие, простоев в работе всей ЗСЛ. При оптимальных условиях, а именно, при использовании работников (монтеров пути, стропальщиков), занятых на ЗСЛ, пятого квалификационного разряда, двух дополнительных работников (монтеров пути третьего квалификационного разряда), при повышении вероятности безотказной работы технических средств достигается значительный положительный эффект. Так, увеличивается загрузка оборудования, снижается загрузка рабочего персонала, производительность сборки путевой решетки увеличивается. За

годовой период прирост производительности работы ЗСЛ относительно фактической составляет 5,64 %, что составляет 4,325 километров пути. При этом, в ходе экспериментов также установлен положительный эффект касательно облегчения труда работников, занятых на выполнении ручных операций, а также увеличение загрузки технологического оборудования ЗСЛ. Проведенный анализ результатов экспериментов указывает на эффективность предлагаемых мер, направленных на повышение производительности сборки путевой решетки на ЗСЛ.

Список использованных источников

1. Постановление Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь № 77 от 22 октября 2018 г. «Об установлении расчетной нормы рабочего времени на 2019 год» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kodeksy-by.com/norm_akt/source-МинтрудаРБ/type-Постановление/77-22.10.2018.htm. – Дата доступа: 20.01.2020.

2. Отраслевая база данных нормативных актов по труду / Приказ Начальника БЖД Морозова В.Н. № 397Н от 13.12.2013 г. «Нормы времени на сборку звеньев рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах скрепления СБ-3 на полуавтоматической звеносборочной поточной линии» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.transtekhnika.by/otraslevaya-baza-dannyh-po-trudu>. – Дата доступа: 04.10.2020.

Информация об авторах

Довгяло Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: dm@bsut.by.

Моисеенко Владимир Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Жигар Виктор Игоревич – магистр технических наук, аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: dm@bsut.by.

Письменная Наталья Владимировна – магистр технических наук, аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Information about the authors

Dovgualo Vladimir Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Professor, Acting Head of the Department of “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: dm@bsut.by.

Moiseenko Vladimir Leonidovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Zhigar Victor Igorevich – Master of technical sciences, Post-graduate Student “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: dm@bsut.by.

Pismennaya Nataliya Vladimirovna – Master of technical sciences, Post-graduate Student “Transport and Technological Machines and Equipment Educational Institution”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 06.10.2020 г.

УДК 622.25:004.925.84

Диулин Д.А.¹, Кузнецова М.Г.²¹ОАО «Трест Шахтоспецстрой», г. Солигорск, Беларусь²УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТВОЛОВ ШАХТ

Аннотация. В статье рассмотрены методы моделирования горно-механических объектов, описаны основные программные комплексы для решения задач горной механики на основе аналитического и численного моделирования, указаны особенности подбора исходных данных, допущений и граничных условий для компьютерного моделирования стволов шахт, в том числе, с учетом конкретных режимов их эксплуатации.

Ключевые слова: ствол шахты, численные методы, компьютерное моделирование, мультифизическое взаимодействие.

Diulin D.A.¹, Kuzniatsova M.R.²¹JSC "Trest Shahtospetsstroy", Soligorsk, Belarus²Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

APPROACHES TO MINE SHAFTS MODELING

Abstract. The article considers methods for modeling mechanical mining objects, describes the main software systems for solving problems of rock mechanics based on analytical and numerical modeling, specifies the features of the initial data selection, assumptions and boundary conditions for computer modeling of mine shafts, taking into account their specific operation conditions.

Keywords: mine shaft, numerical methods, computer simulation, multiphysics interaction.

Введение. Безопасность эксплуатации стволов шахт, в первую очередь, зависит от их прочности и устойчивости. Не всегда возможно предсказать скорость деформации и механизм возможных разрушений сооружений, особенно, при значительных глубинах выработки.

Основные причины нарушения работы шахт обусловлены давлением горных пород, коррозией металла и бетона, негативным влиянием воздушной среды, а также воды и водно-солевых растворов (рассолов). В результате происходит нарушение целостности крепи, разрыв элементов защиты (например, глубоких заглушек), появление определенных геологических образований (например, гипс, песчаник), выбросы шахтного газа и др.

Наиболее точная информация о состоянии крепи и тюбинга может быть получена только экспериментальным способом, который часто является неосуществимым из-за недоступности исследуемых участков для прямого инструментального контроля [1]. Поэтому в настоящее время существует множество методов диагностики состояния тюбингов и бетонной крепи стволов шахт, например, натурные исследования [2], GPS-мониторинг [3], неразрушающие методы ультразвуковой томографии и ударного эха [4], спектральный и деформационный анализ систем «сосуд – армировка» вертикальных стволов [5] и т.д., которые могут эффективно предоставить данные о деформации конструкций, но не могут предотвратить или предсказать разрушение элементов заранее. Поэтому компьютерные методы анализа прочности и прогнозирования безопасного срока эксплуатации таких сооружений находят все большее применение.

Цель представленной работы – изучение подходов к компьютерному моделированию стволов шахт, позволяющему оценить их несущую способность и состояние крепи.

Исходные данные для моделирования. Основа для моделирования стволов шахт – геологическая модель и геологическая база данных. Необходимо определить типы горных пород, изучить структурные неоднородности и свойства материала. Горная масса обычно состоит из матрицы дискретных элементов, часть из которых могла быть выветрена, вымыта или изменена в разной степени, в результате чего свойства поверхностей контакта между элементами могут существенно варьироваться.

Неточная или неадекватная модель может привести к большим погрешностям конечного результата. В научных исследованиях различных авторов, например, в работах [6, 7], часто исследования механики горных пород отождествляются с их лабораторными испытаниями. Существенный недостаток такого подхода заключается в том, что количество таких образцов ограничено по размеру, а типичные образцы, испытанные в лаборатории, представляют собой лишь очень небольшую долю процента от объема массы породы. Кроме того, сохранившиеся после сбора и подготовки к процессу тестирования экземпляры представляют собой достаточно предвзятую выборку. Поэтому эти результаты могут использоваться для оценки свойств массива горных пород только с большими допущениями. В то же время, провести лабораторные испытания слоев земных пород на месте тоже не представляется возможным.

Кроме того, во время проходки ствола может быть нарушена целостность ледопородного цилиндра. Например, такая ситуация произошла со стволом № 1 рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», пройденного с применением буровзрывных работ (БВР) до проектной отметки – 834,7 м и введенного в эксплуатацию в апреле 1976 года (диаметр в свету – 7,0 м) [8]. В результате чего произошел прорыв в ствол песчаного плавуча и затопление ствола до определенной отметки, что отрицательно впоследствии сказалось на эксплуатационной пригодности бетонной части крепи ствола и привело к преждевременному коррозионному разрушению внутренней и наружной поверхности бетона, а также существенному снижению несущей способности крепи. То есть реальные характеристики отличаются от характеристик, указанных в стандартах и полученных в результате лабораторных тестов.

Поэтому многие авторы используют средние значения параметров горных пород, характерные для исследуемого региона. Однако и такие данные не всегда доступны, что осложняет процесс задания характеристик горных пород в модели.

Методы моделирования в горной механике и инженерии. Любая горная порода отличается от большинства других инженерных материалов тем, что содержит неоднородности того или иного типа, что приводит к дискретизации ее структуры. При этом нетронутая порода может рассматриваться как сплошное или поликристаллическое твердое тело, свойства которого регулируются физическими свойствами материалов, из которых оно состоит, и способом их взаимосвязи. Структура горного массива вокруг выработки включает неповрежденные блоки породы, разделенные такими неоднородностями, как стыки, плоскости напластования, складки, зоны сдвига и разломы. На основе анализа литературных источников разработана схема методов моделирования, которые используются при решении задач горной механики и инженерии (рисунок 1).

Среди всех выделенных методов моделирования процессов горной механики при анализе взаимодействия стволов шахт с породами, окружающими выработку, наиболее часто используются аналитические и численные методы.

Ранние аналитические модели в механике горных пород восходят к решениям замкнутой формы, например, для расчета напряжений, окружающих круглое отверстие в напряженной пластине, опубликованной Киршем в 1898 году [9, с. 19].

При этом аналитическое моделирование предполагает использование упрощенных эквивалентных моделей. Например, в работе [10] выполнен анализ имеющихся в

литературе аналоговых моделей стволов шахт и рассматривается возможность использования эквивалентных пружинных моделей для анализа предельной прочности стволов шахт. Подход, предлагаемый в этой статье, заключается в разработке простых уравнений, которые устранят необходимость построения полной численной модели. Массивы горных пород принимаются упругими, при этом максимальное упругое напряжение сопровождается резким падением прочности материала, следовательно, анализа упругости будет достаточно для оценки предельной прочности ствола шахты. Однако при учете деформаций авторы рекомендуют обращаться к численным методам решения подобных задач.



Рисунок 1. – Методы моделирования, используемые при решении задач горной механики и инженерии

Таким образом, упрощенные эквивалентные модели могут быть использованы лишь для определения приближенных значений нагрузок, испытываемых конструктивными элементами шахты. При моделировании шахтных стволов также нужно учитывать наличие дефектной среды вокруг области выработки, включающей локальные зоны деформирования и разрушения, однако аналитические методы практически не позволяют учесть такие параметры.

С начала 1960-х годов стало возможным использование итерационных численных методов, таких как метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), метод граничных элементов (МГЭ), метод дискретных элементов (МДЭ) и комбинации этих методов [11]. Они стали почти универсальными инструментами для решения задач механики горных пород и подходят для определения и прогнозирования прочностных характеристик шахтных конструкций и массивов грунтов вокруг выработки.

МКЭ (FEM в иностранной литературе от Finite Element Method) – один из самых распространенных методов численного решения задач широкого профиля. Суть метода заключается в разделении области поиска решения дифференциальных уравнений (тела) на конечное количество подобластей (более мелкие конечные элементы различной формы), например, как показано на рисунке 2. МКЭ широко применяется для решения мультифизических задач, а также задач, включающих тела сложной геометрической формы.

МКР в зарубежных исследованиях обозначается FED (Finite Element Difference) состоит в замене исходной (непрерывной) задачи математической физики ее дискретным аналогом (разностной схемой), а также последующим применением специальных алгоритмов решения дискретной задачи [12].

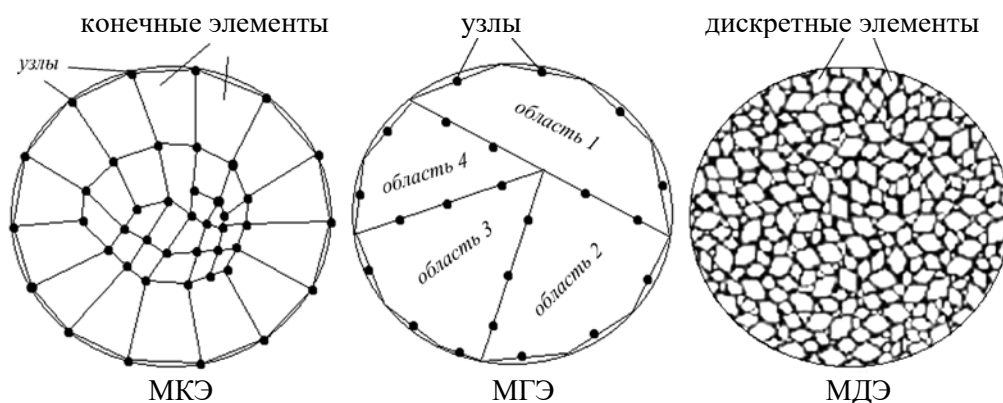


Рисунок 2. – Представление тел с использованием наиболее распространенных численных методов моделирования

Детерминированный метод МГЭ (BEM – Boundary Element Method) включает сетку, которая расположена только на границах области, и, следовательно, нашел наибольшее применение при решении задач со свободными поверхностями [11].

Применение МДЭ (DEM в англоязычных источниках – Discrete Element Method) основано на представлении горной породы как множества дискретных частей (кристаллов, гранул, молекул) [11]. Целесообразно использовать МДЭ для решения задач механики устойчивости и сдвига горных пород, например, при расчетах устойчивости склонов.

Каждый из указанных численных методов имеет свои преимущества и недостатки, однако МКЭ наиболее широко применяется в инженерных программных комплексах, позволяющих решать, в том числе, задачи горной механики.

Современные программные комплексы для решения задач горной механики.

В настоящее время компьютерное моделирование механики горных пород и грунтов возможно в следующих средах: GEO5 Rock Stability, SVSlope, GeoStru, программные продукты Rocscience, Dips, Scoops3D и др.

Программа GEO5 Rock Stability используется для анализа устойчивости откосов и стен горных пород при определенном виде разрушения, включая плоскую или многоугольную поверхность скольжения и взаимодействие с укрепляющей стеной [13].

Пакет SVSlope предоставляет возможности 2D/3D анализа устойчивости откосов. Пользователи могут выполнять классический анализ предельного равновесия откосов грунта, горных пород методом срезов или путем расчета напряжений [14].

GeoStru – программное обеспечение для расчета несущей способности и осадки на горных и рыхлых грунтах по различным методикам. Позволяет классифицировать грунты, строить стратиграфические диаграммы для геологического или геотехнического использования с моделями для скважин, рассчитать осадки фундаментных оснований на сваях, проектировать габионные стены, простые бетонные и габионные водосливы, исследовать влияние сейсмических колебаний на горные породы, рыхлые грунты и удерживающие их конструкции [15].

Slide 2/3, RocPlane, RS2/3, RocFall, RocTopple, SWedge, Dips – программные продукты компании Rocscience, позволяющие выполнять плоский и пространственный анализ грунтов с различными физико-механическими свойствами, оценить риски обвалов и трещин [16].

Технологию информационного моделирования зданий (BIM – Building Information Modeling), проектирование и расчет строительных и машиностроительных конструкций различного назначения реализует программный комплекс ЛИРА-САПР.

В нем выполняются расчеты статических (силовых и деформационных) и динамических нагрузок, выполняется подбор и проверка сечений стальных и железобетонных конструкций, выдаются эскизы рабочих чертежей металлических конструкций и отдельных железобетонных элементов [17]. При этом коэффициенты сжатия и сдвига в соответствии с физико-механическими свойствами грунтов могут быть определены по различным моделям программой ЗАПРОС в составе расчетного комплекса SCAD Office [18].

Трехмерная визуализация данных проходки и эксплуатации шахтных стволов возможна средствами ArcGis – элемента информационно-аналитической системы «сооружение – геологическая среда» [19]. Такие модели содержат техническую характеристику инженерных сооружений и предполагают расчет показателей, характеризующих геологическое строение (аналог ВМ-моделирования), например, как на рисунке 3.

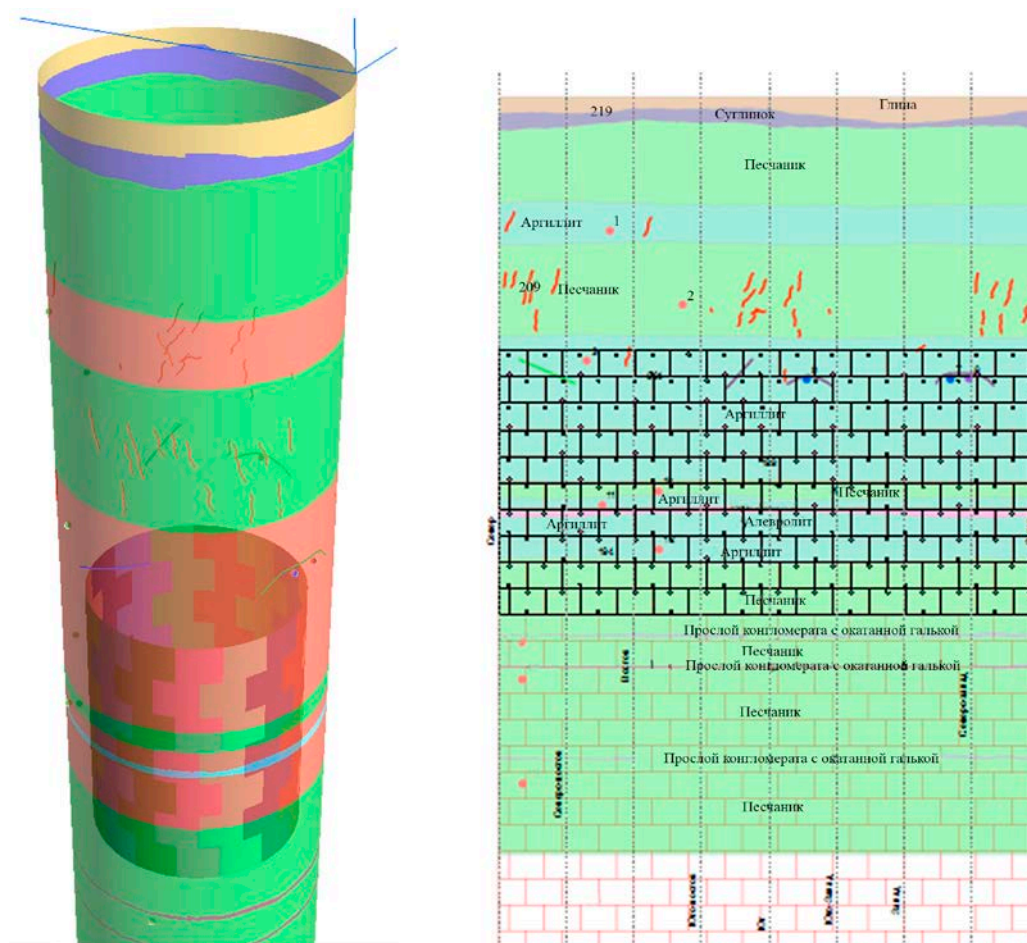


Рисунок 3. – Визуализация трещин в трехмерном виде и на развертке [19]

Для решения задач инженерной геотехники и проектирования может быть использована программа Plaxis [20], при этом параметры стволов при длительной их эксплуатации рассчитать в ней довольно проблематично.

Однако возможности перечисленных программных продуктов ограничены, в основном, моделированием поверхностных горных пород и ограниченными возможностями моделирования конструкций и сооружений, взаимодействующих с грунтами под землей.

Многие исследователи для решения контактной задачи используют плоские (двумерные) модели, однако они не позволяют получить полную картину напряжений и деформаций ствола шахты в зависимости от окружающей среды и глубины бурения.

Задачи по анализу прочности конструкций стволов шахт сопряжены также с анализом статике систем, включающих твердые тела и жидкости, представляющие собой растворы с различным содержанием солей в зависимости от слоя породы, окружающей ствол шахты. Поэтому возникает необходимость в использовании мультифизического анализа при моделировании воздействий на ствол шахты от окружающих горных пород в период эксплуатации, что приведенными выше программными комплексами не предусмотрено. Для исследования прочности, напряженно-деформированного состояния и других параметров конструкций под действием статических и динамических нагрузок целесообразно применять программные комплексы, реализующие МКЭ для широкого круга задач, в том числе мультифизических. Например, ANSYS, ABAQUS, MSC.Nastran и пр.

Особенности моделирования стволов шахт. При моделировании шахтных стволов нужно учитывать наличие дефектной среды вокруг области выработки, включающей локальные зоны деформирования и разрушения.

Проектные размеры бетонной крепи и ее расчетные прочностные параметры также не совпадают с фактическими, что обусловлено неточностью установки опалубки, ее эксплуатационной деформацией, отличием запланированного объема вывалов породы от фактических, наличием «холодных швов» и др. С течением времени бетонная крепь постепенно теряет свои первоначальные свойства, рыхлеет, истончается. Реальную толщину бетона вокруг ствола можно определить, например, акустическими методами, однако подобное оборудование не всегда доступно по цене.

Давление горных пород по длине шахтного ствола распределено не равномерно. Например, на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий» при ведении проходческих работ забоем ствола пересекались породы различных геологостратиграфических подразделений, существенно различающихся по составу и свойствам. Глинисто-мергелистая толща (ГМТ) сложена преимущественно глинистыми мергелями и аргиллитоподобными глинами, с глубины ~340 м до отметки 417 м в разрезе ГМТ появляются субгоризонтальные прослои гипса мощностью 5-10 см. Ниже по разрезу породы ГМТ характеризуются наличием частого переслаивания глин и мергелей с сульфатно-карбонатными породами. Прочность пород на данном интервале не превышает 10-15 МПа. Соленосная толща, вскрытая на глубине 545,7 м, представлена каменной солью, загрязненной глинистым материалом, с прослоями глинисто-карбонатных пород. Стволом вскрыты промышленные калийные горизонты на глубине 589,8 м и 795,6 м. Прочность глинистых и карналлитовых пород не превышает 15 МПа, каменной соли и сильвинита изменяется в пределах 25-30 МПа, кроме прочности указанные породы сильно отличаются по водоносности. Мезозойско-кайнозойские пески и супеси сильно обводнены и представляют собой водоносный комплекс, а девонские отложения представлены слабообводненными и слабоводопроницаемыми породами ГМТ [8].

Кроме того, с изменением длины ствола изменяется и его жесткость, что вызвано изменением плотности и толщины заполнителя закрепного пространства от сечения к сечению. Поэтому для проведения расчетов необходимо определить характер естественного поля напряжений на рассматриваемом участке и установить значения главных напряжений в массиве, а также учесть изменения этих параметров в динамике в зависимости от срока эксплуатации вертикальной шахты.

При компьютерном моделировании вертикальных стволов шахт применяются следующие граничные условия: для нижней грани ограничены вертикальные перемещения, для боковых граней – перемещения в направлении, перпендикулярном плоскостям граней, верхняя грань модели обычно загружается равномерно распределенным вертикальным давлением от вышележащей породной толщи.

Реальная форма породного контура и геометрия сечения ствола при буровзрывном способе проходки обычно искажены. Вместо предполагаемых гладких поверхностей по факту образуется неровная поверхность со сложной геометрией. С течением времени образовавшиеся неровности запланированного концентрического контура становятся более выраженными, что обусловлено влиянием отслаивания, коррозии и вымывания. В результате чего горизонтальное сечение монолитной бетонной крепи представляет собой фигуру неправильной формы с переменной жесткостью.

Выводы.

1. Наиболее целесообразно применять численные методы для моделирования стволов шахт с учетом их деформации, условий эксплуатации и взаимодействия с разными средами.

2. Задачи на мультифизическое взаимодействие горных пород друг с другом и окружающей средой могут быть решены на основе компьютерного моделирования в таких комплексах, как ANSYS, ABAQUS и пр.

3. Вероятность присутствия некоторых факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики стволов шахт, носит стохастический характер, поэтому возможно принятие некоторых допущений либо использование корректирующих коэффициентов при прочностных расчетах стволов шахт.

4. Адекватная модель конкретного шахтного сооружения должна учитывать геологические характеристики горных пород, окружающих выработку, сроки и условия функционирования шахты, результаты исследований толщины, прочности, состояния металлической и бетонной частей ствола шахты, полученные неразрушающими методами.

Список использованных источников

1. Сергеев, С.В. Обследование ствола шахты, эксплуатируемого в сложных инженерно-геологических условиях / С.В. Сергеев, Е.Д. Воробьев, Н.В. Фролов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – №. 2. – С. 63-67.

2. Сергеев, С.В. Диагностика и мониторинг напряженного состояния крепи вертикальных стволов / С.В. Сергеев, Д.М. Казакаев. – М.: Горная книга, 2011. – 244 с.

3. Wang, D. Research on Monitoring of Coal Mine Shaft Deformation Based on Fiber Grating Technology / D. Wang, W. Yang // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1549, № 4. – 7 p.

4. Hola, J. Evaluation of adhesion of concrete screed to mine shaft wall by means of nondestructive acoustic methods / J. Hola, K. Schabowicz, L. Sadowski // 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016 [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/342153628_EVALUATION_OF_ADHESION_OF_CONCRETE_SCREED_TO_MINE_SHAFT_WALL_BY_MEANS_OF_NONDESTRUCTIVE_ACOUSTIC_METHODS. – Дата доступа: 20.09.2020.

5. Ильин, С.Р. Спектральный и деформационный анализ систем «сосуд – армировка» вертикальных стволов / С.Р. Ильин, М.В. Дубинин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАНУ. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 122. – С. 164-193.

6. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China / S.Q. Yang [et al.] // Eng. Geol. – 2017. – Vol. 217. – P. 89-101.

7. Jia, Y. Numerical modelling of shaft lining stability: PhD Thesis / Y. Jia. – Nottingham, 2010. – 312 с.

8. Выполнить анализ результатов проведенных обследований крепи стволов, оценить необходимость и объемы геофизических работ на деформированных участках:

отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 899.С.2009, этап 1.4) / ОАО «Белгорхимпром»; рук. А.М. Ефимов; исполн.: Кафанова Т.П. [и др.]. – Минск, 2009. – 42 с. – № ГР 20092386.

9. Hoek, E. Practical rock engineering / E. Hoek // Environmental & Engineering Geoscience [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscience.com/as-sets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>. – Дата доступа: 22.09.2020.

10. Mitelman, A. Development of a spring analogue approach for the study of pillars and shafts / A. Mitelman, D. Elmo, D. Stead // International journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28, № 2. – P. 267-274.

11. Jing, L. Numerical methods in rock mechanics / L. Jing, J.A. Hudson // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – Vol. 39, № 4. – P. 409-427.

12. Дегтярев, А.А. Метод конечных разностей / А.А. Дегтярев. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – 83 с.

13. GEO5 Geotechnical software – Professional Package [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.finesoftware.eu/geotechnical-software>. – Дата доступа: 24.09.2020.

14. SVSlope [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sigirgroup.ru/obrazovanie-i-nauka/svslope.html>. – Дата доступа: 24.09.2020.

15. GeoStru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geostru.eu>. – Дата доступа: 24.09.2020.

16. Rocscience products [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.roscience.com/software>. – Дата доступа: 24.09.2020.

17. Лира-САПР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.liraland.ru>. – Дата доступа: 21.10.2020.

18. Абезьяев, М.А. Пакет программ SCAD OFFICE, используемый при проектировании / М.А. Абезьяев // Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций: сб. научн. тр. 2-й Межд. науч.-практ. конф. Т. 1. – Курск: Ю-УГУ, 2019. – С. 18-22.

19. Красильников, П.А. Трехмерная визуализация данных проходки и эксплуатации шахтных стволов средствами ArcGis как элемент информационно-аналитической системы «сооружение – геологическая среда» / П.А. Красильников // Научная визуализация. – 2020. – № 2, т. 12. – С. 84-97.

20. Plaxis. Геотехнические расчеты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plaxis.ru>. – Дата доступа: 22.10.2020.

Информация об авторах

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

Кузнецова Марина Григорьевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая физика и теоретическая механика», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: maryna.g.kuzn@gmail.com.

Information about the authors

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

Kuzniatsova Maryna Rygorauna – Ph. D., Associate Professor of Technical Physics and Engineering Mechanics Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: maryna.g.kuzn@gmail.com.

Поступила в редакцию 15.02.2021 г.

УДК 661.152.3'1/9-91(045)

Высоцкая Н.А.¹, Францкевич В.С.²¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь²УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ШИХТЫ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Аннотация. Представлены некоторые особенности использования NPK-удобрений. Описан процесс подготовки шихты для гранулирования. Проиллюстрирована линия по производству сложно-смешанных удобрений, и описан процесс получения удобрений. Механизм гранулирования методом окатывания состоит из четырех стадий: смешение исходного порошка с частицами ретур и связующим; образование гранул из мелких частиц и дробление комков; окатывание и уплотнение гранул; стабилизация структуры гранулы. Установлено, что на всех стадиях происходит распределение частиц по размерам. Интенсивность распределения зависит от свойств продукта, технологии, аппаратного оформления процесса гранулирования и др. Отмечено, что с увеличением содержания влаги физико-механические свойства (гигроскопичность, слеживаемость) гранул значительно ухудшаются.

Ключевые слова: влага, гранула, гранулирование, комок, окатывание, ретур, шихта.

Vysotskaya N.A.¹, Frantskevich V.S.²¹JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus²Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**MOISTURE CONTENT OF THE CHARGE OF COMPLEX FERTILIZERS**

Abstract. Some features of the use of NPK-fertilizers are presented. The process of preparing a charge for granulation is described. The line for the production of complex-mixed fertilizers is illustrated, and the process of obtaining fertilizers is described. The mechanism of granulation by the pelletizing method consists of four stages: mixing the initial powder with recycle particles and a binder; formation of granules from small particles and crushing of lumps; pelletizing and compaction of granules; stabilization of the granule structure. It was found that at all stages there is a particle size distribution. The intensity of distribution depends on the properties of the product, technology, hardware design of the granulation process, etc. It is noted that with an increase in moisture content, the physical and mechanical properties (hygroscopicity, caking) of granules are significantly deteriorated.

Keywords: moisture, granule, granulation, lump, pelletizing, recycle, charge.

Введение. Во многих отраслях промышленности (химической, металлургической, пищевой, строительных материалов, и др.), а также в сельском хозяйстве широкое применение получили гранулированные материалы [1, 2].

Правильно выбранные методы и условия гранулирования обеспечивают получение готового продукта с требуемыми качественными показателями. В настоящее время изучены, разработаны и освоены в промышленности разнообразные схемы гранулирования с применением аппаратов различных по конструкции и по принципу действия. Процессы гранулирования минеральных удобрений разнообразны как по методам их осуществления, так и по аппаратному оформлению.

Получение высоких и стабильных урожаев сельскохозяйственных культур часто возможно лишь при создании оптимальной системы питания растений и, прежде всего, за счет применения удобрений [3]. В настоящее время в химической промышленности

получили широкое распространение процессы гранулирования тонкодисперсных порошков. При этом в качестве связующих используют различные вещества, отличающиеся своей природой и свойствами [4]. Установление взаимодействия раствора связующего с компонентами тукосмеси при формировании гранул КС1 является сложной задачей, т.к. в процессе гранулирования и сушки на поверхности и внутри гранул происходит образование новых фаз и кристаллических соединений, которые являются рентгеноаморфными и не поддаются анализу.

НРК – универсальное азотно-фосфорно-калийное минеральное удобрение, содержащее все основные питательные элементы, которые обеспечивают сбалансированное питание растений. Некоторые особенности использования НРК-удобрений:

- позволяет осуществлять индивидуальный подбор норм и способов внесения удобрения в зависимости от определенной культуры и почвы, путем выбора подходящего соотношения компонентов;
- добавление антислеживающих добавок обеспечивает длительное сохранение всех свойств удобрения: повышается сыпучесть и замедляется растворение, что значительно сокращает потерю азота при орошении [5].

Во многих случаях при гранулировании сложных и сложно-смешанных удобрений ретур (мелкая фракция) вводится в грануляционный аппарат для поддержания оптимальной влажности и обеспечения максимального выхода товарной фракции.

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

К безретурным методам гранулирования относится отверждение капель плава потоком воздуха или в масле [6].

Приготовление шихты для гранулирования. В технологический поток исходных компонентов добавляется ретур (некондиционный по грансоставу готовый продукт из технологического процесса).

Сухая смесь, состоящая из исходных компонентов, пыли и ретура, элеватором подается на двухвальный смеситель. Смеситель представляет собой горизонтальное корыто U-образного сечения, в котором вращаются в противоположных направлениях два параллельных вала. На валах укреплены перемешивающие и транспортирующие лопатки.

В смесителе происходит интенсивное перемешивание компонентов, увлажнение и образование шихты за счет подачи технической воды и/или абсорбционных стоков, подогрев шихты за счет подачи водяного пара. Образующиеся в процессе газоочистки отходящих газов абсорбционные стоки подаются в смеситель из бака насосом или несколькими насосами.

Расход технической воды и/или абсорбционных стоков и пара регулируется в необходимом количестве, оптимальном для образования шихты требуемой влажности и температуры.

В смеситель могут подаваться растворы сульфата аммония и гидрогумата (регулятора роста).

Приготовление раствора сульфата аммония производится на установке, состоящей из двух баков с мешалками, центробежных насосов, трубопроводов и запорной арматуры. Предусмотрен подогрев растворов в баках подачей пара в змеевики теплообменников. Приготовление раствора сульфата аммония производится поочередно в одном из баков – в одном готовится раствор, а из второго раствор подается в технологический процесс. Центробежные насосы также работают поочередно – один работает на циркуляцию при приготовлении раствора, второй подает раствор в процесс. Процесс приготовления раствора сульфата аммония включает следующие операции:

- набор в бак воды до уровня 70 %;
- открытие подачи пара на подогрев;
- включение привода мешалки;
- загрузка сульфата аммония (производится путем поднятия мешков с сульфатом аммония при помощи грузоподъемного механизма и выгрузки мешков в бак сверху);
- доведение до верхнего уровня раствора в баке путем подачи воды в бак;
- включение насоса по циркуляционной схеме после достижения заданной температуры раствора в баке;
- после достижения минимального уровня раствора во втором баке производится перевод насоса по схеме подачи раствора в технологический процесс из первого бака с приготовленным раствором.

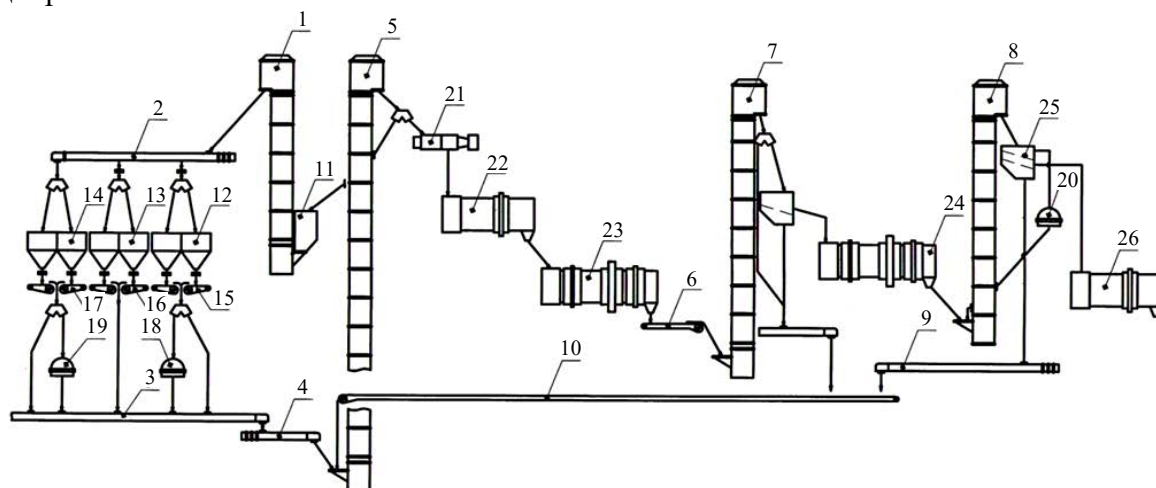
Приготовление раствора гидрогумата производится на установке, состоящей из двух баков с мешалками, центробежных насосов, трубопроводов и запорной арматуры. Предусмотрен подогрев растворов в баках подачей пара в змеевики теплообменников.

Приготовление и подача в технологический процесс раствора гидрогумата производится также, как и раствора сульфата аммония, по аналогичной схеме, за исключением операции загрузки в бак. Гидрогумат в жидком виде из бочек загружается через верхний люк баков.

Регулирование расхода растворов сульфата аммония и гидрогумата выполняется регулирующими электрическими задвижками.

Линия по производству сложно-смешанных NPK-удобрений. Особенностью технического решения является то, что в линии для получения сложно-смешанного удобрения, содержащей связанное транспортирующими механизмами оборудование, включающее бункеры, дозаторы, дробилки, смеситель, барабан-гранулятор, барабан-сушилку, барабан-холодильник, грохот и барабан-кондиционер, барабан-гранулятор установлен на опорной платформе, выполненной с возможностью регулировки угла наклона барабана-гранулятора посредством гидроцилиндров, а загрузочная камера барабана-гранулятора выполнена в виде шнекового загрузчика.

На рисунке 1 представлен общий вид линии для получения сложно-смешанного удобрения.



1, 5, 7, 8 – элеваторы; 2, 3, 4, 6, 9, 10 – конвейеры; 11-14 – бункеры; 15-17 – дозаторы; 18-20 – дробилки; 21 – смеситель; 22 – барабан-гранулятор; 23 – барабан-сушилку; 24 – барабан-холодильник; 25 – грохот; 26 – барабан-кондиционер
Рисунок 1. – Линия для получения сложно-смешанного удобрения

Линия для получения сложно-смешанного удобрения работает следующим образом. Исходные компоненты, например, мелкозернистый KCl, карбамид, аммофос, суперфосфат, наполнитель, поступающие из загрузочного бункера, посредством транспортирующих механизмов подаются в промежуточные бункеры и затем в дозаторы соответственно. Компоненты, требующие измельчения, предварительно дробятся в дробилках, и далее все компоненты транспортирующими устройствами подаются в смеситель, куда также поступает сульфат аммония. Полученная в смесителе влажная шихта поступает в загрузочный патрубок шнекового загрузчика, который подает шихту во внутреннее пространство корпуса барабана-гранулятора, обеспечивая при этом равномерность и однородность потока поступающей влажной шихты. Заданная производительность барабана-гранулятора обеспечивается углом его наклона в сторону выгрузки, который выбирают в пределах от 1 до 3°, определяя экспериментально оптимальный угол для конкретного гранулометрического состава продукта, и устанавливают посредством изменения угла наклона опорной платформы. В барабане-грануляторе происходит окатывание исходной шихты, а отгранулированная шихта поступает в барабан-сушилку, а затем посредством транспортирующих механизмов в барабан-холодильник, затем элеватором в грохот. Крупную фракцию измельчают в дробилке. Дробленый материал вместе с мелкой фракцией в качестве ретура возвращают в технологический процесс посредством транспортирующих устройств. Готовый продукт обрабатывается в барабане-кондиционере антислеживателем [7].

Механизм гранулирования. Гранулирование – совокупность физико-химических и физико-механических процессов, обеспечивающих получение частиц определенной формы, размеров и прочности и сопровождающихся уплотнением структуры вещества.

Гранулирование методом окатывания состоит из четырех стадий:

- 1 – смешение исходного порошка с частицами ретура и связующим;
- 2 – образование гранул из мелких частиц и дробление комков;
- 3 – окатывание и уплотнение гранул;
- 4 – упрочнение связей в результате перехода жидкой фазы в твердую (стабилизация структуры гранулы).

На всех стадиях происходит распределение частиц по размерам. Интенсивность распределения зависит от свойств продукта, технологии, аппаратного оформления процесса гранулирования и др.

Стадии смешения и образования гранул. Связующими выступают различные жидкости, способствующие сцеплению частиц. Чаще всего используют дешевые вещества, (вода, плав одного из компонентов, раствор продукта).

Характер капиллярного взаимодействия в слое сыпучего материала определяется количеством воды в точке контакта, формой контакта и числом контактов в единице объема материала.

При минимальном содержании в сыпучем материале мелких фракций зазоры между крупными зернами остаются почти свободными. Поэтому сравнительно высокое среднеэффективное расстояние между частицами способствует снижению прочности сцепления. С увеличением содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, это приводит к возрастанию прочности гранул. Положительная роль крупных фракций заключается в том, что они создают своеобразный скелет образца, обладающий хорошим сопротивлением воздействию статических и динамических нагрузок, а определенное количество мелких частичек уменьшает среднее расстояние между крупными зернами, и возникает сила сцепления, препятствующая изменению жесткой структуры слоя. Только при определенном соотношении крупных и мелких

частиц получается наиболее плотная упаковка и достигается наиболее высокая сила сцепления их в увлажненном материале.

Порошок, поступающий на гранулирование, имеет однородный гранулометрический состав. Крупные частицы поступают с ретуром, прошедшим обкатку и сушку и отсеянным от продукта. Из-за различной структуры частицы ретура и порошка по-разному смачиваются жидкостью. Скорость капиллярного всасывания определяется такими свойствами жидкости, как вязкость, плотность, поверхностное натяжение и свойствами материала – радиусом капилляров, природой вещества, состоянием его поверхности.

Процесс образования зародыша и формирования гранулы при подаче жидкости в гранулятор имеет следующий вид: капля воды, попавшая в слой материала, под действием капиллярных сил незамедлительно начинает распространяться во все стороны, заполняя при этом поры между отдельными частицами. Наибольший размер образующихся комков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Вода перестает распространяться в сыпучем материале, как только комок достигнет предельной капиллярной влагоемкости. Это время измеряется несколькими секундами. Для увлажнения частиц ретура требуется намного больше времени.

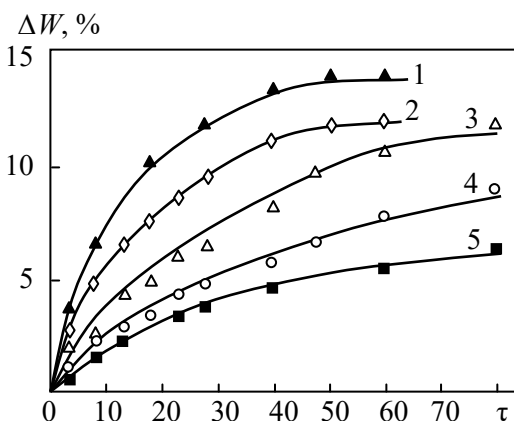
Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата диаметром 2-4 мм, помещенными в слой шихты различной влажности W с размером частиц 0,1-0,3 мм, представлены на рисунке 2.

Скорость приращения влагосодержания в грануле тем выше, чем больше влагосодержание порошка и меньше прочность гранул. В начальный период времени τ влага поглощается гранулами наиболее интенсивно.

Изменение характера влагопоглощения с течением времени связано с тем, что вначале влага поглощается поверхностным слоем гранул под действием капиллярных сил. По мере насыщения этого слоя влага просачивается внутрь гранулы, где имеются открытые и закрытые поры, заполненные воздухом. Далее поглощение влаги резко замедляется и ограничивается растворением воздуха в жидкой фазе. Чем выше влагосодержание порошка, тем более интенсивно насыщается поверхностный слой гранул и тем скорее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому.

При увлажнении порошка под действием капиллярных сил одновременно происходит и уплотнение. Чем мельче частицы и больше поверхностное натяжение жидкости, тем плотнее агломерат. Таким образом, при увлажнении порошка двойного суперфосфата пористость агломерата, образованного вокруг капли, такая же, как и гранулы. Образовавшийся агломерат далее уплотняется окатыванием.

Окатывание. Уплотнение частиц методом окатывания происходит при ударе о стенку гранулятора или о неподвижный слой материала. Большая часть кинетической энергии, которую получает комок при скатывании вниз, расходуется на уплотнение гранулы и перемещение зерен. Должен существовать минимальный размер влажного



- 1 – прочность гранул 2 МПа, $W = 21,2\%$;
2 – прочность 2 МПа, $W = 18,5\%$;
3 – прочность 2 МПа, $W = 15,5\%$;
4 – прочность 3 МПа, $W = 15,5\%$;
5 – прочность 4 МПа, $W = 15,5\%$

Рисунок 2. – Кривые поглощения влаги гранулами двойного суперфосфата с различной прочностью

комка, при котором он обладает достаточной кинетической энергией во время ссыпания. Если масса комка меньше критической величины, то приобретенной энергии не хватит для уплотнения.

Комки в результате неоднократных ссыпаний и ударов уплотняются, отдельные частицы, перемещаясь, укладываются более плотно. При этом избыточная влага вытесняется на поверхность комка, в результате чего становится возможным дальнейшее присоединение к комку сухих частиц. По мере приближения частиц друг к другу толщина пленок связанной воды уменьшается, а прочность сцепления становится больше.

При работе гранулятора внутри комка формируется определенная минимальная толщина водных пленок, равная величине динамических нагрузок. При достижении этой толщины дальнейшее выделение воды на поверхность комка прекращается, гранула прекращает расти, ее прочность достигает максимума для данного режима.

Наличие в шихте сухих плотных частиц ретур приводит к тому, что влага не только всасывается во внутрь, но и выдавливается на поверхность. При одинаковых интенсивностях этих процессов гранулы не растут, а при преобладании всасывания над другими процессами происходит измельчение гранул, поскольку ослабевают связи между частицами. Для дальнейшего увеличения размера гранул окатыванием на поверхность извне следует вводить дополнительное количество жидкости. При большом содержании ретура в шихте и однократном увлажнении на его поверхности создается временный избыток жидкой фазы, в результате чего происходит рост гранул, хотя этого количества жидкости недостаточно для устойчивого ведения процесса гранулирования. Далее частицы ретура продолжают впитывать в себя жидкость. По истечении определенного времени на поверхности частиц ретура жидкости уже не хватает, и агломераты разрушаются.

Однократное введение требуемого количества жидкости приводит к чрезмерному увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. Для получения гранул требуемого размера шихту необходимо увлажнять постепенно с учетом кинетики влагопоглощения. В большинстве случаев, время насыщения гранул влагой намного превышает время, необходимое для окатывания гранул при заданных динамических нагрузках. Для поддержания на поверхности гранул оптимальной влажности следует производить увлажнение шихты весь период окатывания.

В момент перекатки гранулы через зерно мелкой фракции происходит толчок в направлении центра гранулы. Развивающееся при этом давление достигает сотен атмосфер и способствует формированию гранул в сферы. На поверхности перекатывающегося шарика возникает толчок и срезающее усилие. Часть неровностей гранулы не выдерживает этих напряжений и разрушается, а прочно прилипшие зерна вдавливаются внутрь.

Структура гранулы уплотняется постепенно под действием большого числа ударов различного направления, в результате чего взаимное перемещение частиц происходит только на тех участках, где в данный момент сила сцепления имеет наименьшее значение. Динамические нагрузки в грануляторе не должны превышать допустимые. Напряжения в комке не должны быть разрушающими.

Стадия стабилизации структуры гранул. Связи между частицами, уплотненными при окатывании, в большей мере обусловлены силами поверхностного натяжения жидкости. Эти связи обеспечивают достаточную пластичность материалу и позволяют в широких пределах модифицировать форму гранулы без ее разрушения. Для получения готового продукта необходимо упрочнять связи, придавая жесткость полученной структуре. Это достигается удалением жидкой фазы или переводом ее в твердую фазу.

Одним из наиболее распространенных способов упрочнения гранул является сушка. В процессе сушки образуются новые фазовые контакты, кристаллические спайки между отдельными частицами гранулы, приводящие к увеличению прочности. Конечное содержание влаги в продукте в значительной мере определяет физико-механические свойства, такие как гигроскопичность, слеживаемость, прочность и др. С увеличением содержания влаги физико-механические свойства значительно ухудшаются.

Влага, входящая в состав гранул, включает поверхностную влагу, удерживаемую в гранулах механическими силами сцепления, сорбционную влагу, удерживаемую вследствие адсорбции и абсорбции, и капиллярную влагу, заполняющую капилляры и поры гранул.

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

- размерами частиц высушиваемого материала;
- параметрами теплоносителя (температура, влагосодержание, скорость);
- величиной начальной и конечной влажности материала, а также его температурой;

- структурой материала и формой связи влаги с ним.

В процессе удаления из гранулы жидкой фазы может происходить не только упрочнение структуры, но и ее разрушение [6].

Вывод. Сила капиллярного сцепления в объеме увлажненного сыпучего материала тем ниже, чем из более крупных зерен он состоит. Высокое среднеэффективное расстояние между частицами приводит к понижению прочности сцепления. При увеличении содержания мелких фракций структура материала становится более плотной, прочность гранул возрастает.

Предельный размер образующихся комков прямо пропорционален величине капли и обратно пропорционален пористости слоя материала. Чем выше влагосодержание порошка, тем быстрее насыщается поверхностный слой гранул и тем быстрее наступает переход от одного характера влагопоглощения к другому. Чем больше поверхностное натяжение жидкости и мельче частицы, тем плотнее агломерат. Введение требуемого количества жидкости приводит к увеличению влажности шихты и образованию крупных агломератов. С уменьшением содержания влаги физико-механические свойства агломератов улучшаются.

Список использованных источников

1. Прушак, В.Я. Разработка новых технических решений по увеличению выпуска гранулированного хлорида калия с применением валковых прессов, изготавливаемых в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» / В.Я. Прушак, Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая / Труды БГТУ. – 2020. – Сер. 2, № 1. – С. 62-67.
2. Высоцкая, Н.А. Особенности получения NPK-удобрений методом окатывания / Н.А. Высоцкая, В.С. Франкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 79-85.
3. Леонов, Ф.Н. Эффективность минеральных удобрений в зависимости от обеспеченности подвижными фосфатами дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы / Ф.Н. Леонов, Т.Г. Синевич // Почвоведение и агрохимия. – 2017. – № 1 (58). – С. 109-116.

4. Кузьминых, К.Г. Формирование гранулометрического состава хлорида калия в результате температурноциклонной обработки пылевидных фракций / К.Г. Кузьминых, В.З. Пойлов // Химическая промышленность сегодня. – 2015. – № 5. – С. 7-15.

5. Кондратчик, Н.Ю. Методы гранулирования NPK-удобрений. Способы гранулирования методом прессования и окатывания / Н.Ю. Кондратчик, Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 1. – С. 56-70.

6. Методы гранулирования удобрительных композиций / А.А. Болысбек [и др.] // Социально-экономические и гуманитарные науки. Образование. Культура. Общество. Технические и естественные науки: сб. статей по материалам научн. конф. ГНИИ, Санкт-Петербург, 26-28 июня 2019 г. / НОУ доп. проф. образования Гуманитарный национальный исследовательский институт «НАЦРАЗВИТИЕ». – Санкт-Петербург, 2019. – С. 178-180.

7. Прушак, В.Я. Разработка и внедрение новой технологической линии по производству сложносмешанных NPK-удобрений / В.Я. Прушак, И.М. Заяц, В.И. Новошконова // Proceedings: XII Национальная конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых, Варна, 26-30 июня 2013 г. / Научно-технический Союз по горному делу, геологии и металлургии. – Варна, 2013. – С. 359-362.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

УДК 622.673.83-562(045)(476)

Казаченко Г.В., Басалай Г.А.*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЩЕЛЕНАРЕЗНЫХ МАШИН**

Аннотация. Рассматриваются машины для нарезания компенсационных щелей в подземных горных выработках. Оценивается влияние нагрузок на исполнительный орган таких машин при нарезании щелей в почве выработки на сопротивление движению машины. Выполнено сопоставление мощностей на передвижение машины в двух направлениях движения цепи исполнительного органа – цепного бара: при встречном и попутном направлениях резания. Полученные зависимости иллюстрируются посредством сопоставления относительных значений мощностей на передвижение.

Ключевые слова: щеленарезная машина, цепной бар, сопротивление, резание, удельные затраты мощности.

Kazachenko G.V., Basalai R.A.*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***ABOUT INCREASING THE EFFICIENCY OF SLOT-CUTTING MACHINES**

Abstract. Machines for cutting compensation slots in mine workings are considered. The influence of loads on the cutting head of such machines when cutting slots in the roadway floor on the resistance to the movement of the machine is estimated. A comparison is made of the powers for the movement of the machine in two directions of movement of the chain of the cutting head – the chain bar: with the opposite and passing directions of cutting. The resulting dependencies are illustrated by comparing the relative values of the power for movement.

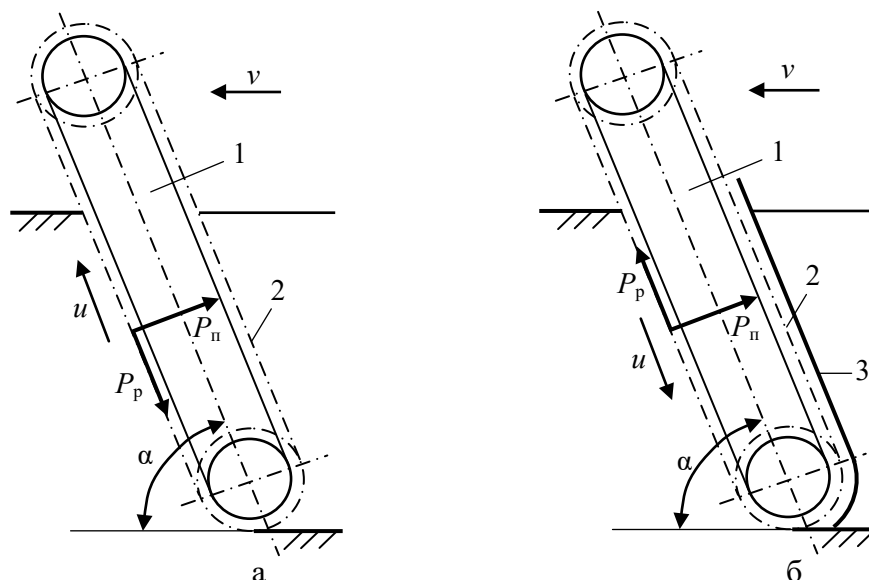
Keywords: slot-cutting machine, chain bar, resistance, cutting, specific power consumption.

Введение. При добыче соляных пород подземными способами разработки месторождения для укрепления горных выработок очень часто используется нарезание компенсационных щелей. Более того, для производства таких работ создан целый ряд щеленарезных машин. В Беларуси подобные машины производятся Солигорским Институтом проблем ресурсосбережения с Опытным производством. История создания щеленарезных машин берет свое начало с первых врубовых машин для облегчения отбойки горных пород от массива [1, 2]. Несмотря на значительный опыт создания подобных машин, их конструкции и режимы работы совершенствуются и в настоящее время. В предлагаемой работе рассматривается один из вариантов повышения эффективности работы щеленарезных машин с исполнительным органом в виде цепного бара.

Содержание исследований и некоторые результаты.

В щеленарезных машинах, производимых в государствах, образовавшихся после распада Советского Союза, используется исполнительный орган в виде цепного бара. Чаще всего этот орган устанавливается таким образом (рисунок 1), что горизонтальная составляющая равнодействующей сил сопротивления резанию и подаче направлена в сторону, противоположную направлению движения машины.

Вместе с тем, возможен и другой вариант установки цепи с резаками (рисунок 1а), в котором горизонтальная составляющая равнодействующей сил сопротивления резанию направлена в сторону движения машины.



а – встречное резание; б – попутное резание; 1 – корпус; 2 – режущая цепь; 3 – кожух

Рисунок 1. – Два варианта привода цепи с резцами

В этом случае равнодействующая сил сопротивления резанию выступает как движущая сила для перемещения машины в целом. Величину этой силы определим, используя общую формулу для определения мощности, необходимой для разрушения горных пород резанием:

$$N_p = e_p \cdot Q, \quad (1)$$

где e_p – удельные затраты мощности для разрушения породы резцами цепного бара;

Q – производительность цепного бара по ходу машины.

Удельные затраты мощности устанавливаются по результатам экспериментальных исследований или расчетным путем по формуле [3]:

$$e_p = c_1 \cdot h^{c_2}, \quad (2)$$

где c_1 – размерный коэффициент, зависящий от прочности породы, типа и состояния резцов;

c_2 – показатель, определяющий степень влияния толщины h стружки на удельные затраты мощности.

Резцы цепного бара при постоянных скоростях движения машины и цепи снимают стружку постоянной толщины:

$$h = \frac{v}{u} t_p \sin \alpha, \quad (3)$$

где v – поступательная скорость бара;

u – скорость цепи бара относительно корпуса;

t_p – шаг установки резцов в линиях резания;

α – угол наклона бара к горизонту (к опорной поверхности машины).

Если известны силы сопротивления резанию отдельных резцов, то их равнодействующая:

$$P_p = \sum_1^n P_{pi}, \quad (4)$$

где P_{pi} – сила сопротивления резанию отдельного резца.

Эта сила может быть определена по формуле:

$$P_{pi} = e_{pi} \cdot S_i, \quad (5)$$

где e_{pi} – удельное сопротивление резанию;

S_i – площадь поперечного сечения слоя породы, обрабатываемого резцом.

Можно отметить, что численно удельные затраты мощности (1) и удельное сопротивление резанию (5) равны между собой [3]. С другой стороны, мощность для разрушения породы резанием можно определить соотношением:

$$N_p = P_p \cdot u, \quad (6)$$

тогда

$$P_p = N_p / u, \quad (7)$$

где N_p определяется по формуле (1).

Определив P_p тем или иным способом, можно вычислить затраты мощности на передвижение машины в обоих вариантах установки цепного бара.

В наиболее распространенном в практике варианте со встречным резанием:

$$N_{д1} = \left[f_d (m \cdot g + P_p \sin \alpha - P_n \cos \alpha) + P_p \cos \alpha + P_n \sin \alpha \right] \cdot v_t, \quad (8)$$

где $N_{д1}$ – мощность на передвижение машины;

f_d – коэффициент сопротивления движению гусеничного движителя;

m – масса машины;

P_n – сила сопротивления подаче;

v_t – теоретическая скорость движения.

В варианте установки цепного бара с попутным резанием:

$$N_{д2} = \left[f_d (m \cdot g - P_p \sin \alpha - P_n \cos \alpha) - P_p \cos \alpha + P_n \sin \alpha \right] \cdot v_t, \quad (9)$$

где $N_{д2}$ – мощность для передвижения машины во втором варианте установки цепного бара.

Если теперь воспользоваться известным соотношением [4]:

$$P_n = K_n \cdot P_p, \quad (10)$$

где K_n – коэффициент пропорциональности между силами сопротивления резанию и подаче, то мощности для передвижения машины:

- при встречном резании

$$N_{д1} = \left[f_d (m \cdot g + P_p (\sin \alpha - K_n \cos \alpha)) + P_p (\cos \alpha + K_n \sin \alpha) \right] \cdot v_t; \quad (11)$$

- при попутном резании

$$N_{д2} = \left[f_d (m \cdot g - P_p (\sin \alpha + K_n \cos \alpha)) + P_p (K_n \sin \alpha - \cos \alpha) \right] \cdot v_t. \quad (12)$$

Для обобщения полученных результатов целесообразно сравнить мощности в некоторых относительных единицах. Например, принять, что массы машин одинаковы,

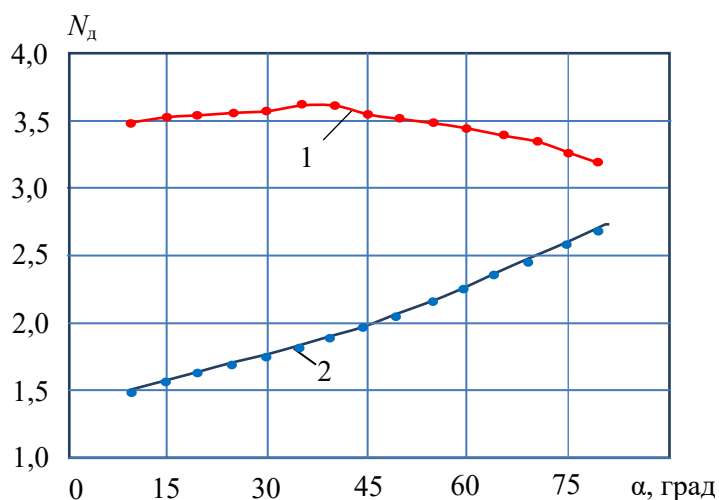
равнодействующие сил сопротивления резанию равны в обоих случаях, а также равны коэффициенты K_n и скорости v_T .

Тогда

$$N'_{д1} = \frac{N_{д1}}{P_p \cdot v_T} = f_d \frac{m \cdot g}{P_p} + \sin \alpha (f_d + K_n) + \cos \alpha (1 - f_d \cdot K_n), \quad (13)$$

$$N'_{д2} = f_d \frac{m \cdot g}{P_p} + \sin \alpha (K_n - f_d) - \cos \alpha (1 + f_d \cdot K_n). \quad (14)$$

Зависимости относительных мощностей (13), (14) от угла α при $f_d = 0,1$, массе машины $m = 25000$ кг, силе сопротивления резанию $P_p = 10000$ Н и $K_n = 0,5$ представлены на рисунке 2.



1 – N_d при встречном резании; 2 – N_d при попутном резании

Рисунок 2. – Относительные затраты мощности на передвижение машины при различных углах α

Простейший анализ приведенных зависимостей и их графических отображений показывает, что затраты мощности на передвижение агрегата существенно уменьшаются при втором варианте установки привода цепного бара. Это означает, что скорость передвижения машины, а значит и производительность можно увеличить.

Заключение. Представленное выше исследование позволяет наметить пути и способы повышения производительности щеленарезной машины. Это можно сделать довольно простым способом – изменением направления движения цепи с резцами. Возможная скорость движения при этом может быть определена путем решения уравнения баланса мощности двигателя привода гусеничного хода. Это уравнение можно представить в виде:

$$N_d = \frac{P_c \cdot v_T}{\eta_1 \cdot \eta_2}, \quad (15)$$

где N_d – мощность двигателя привода гусеничного хода;

P_c – общая сила сопротивления движению гусеничного хода;

η_1 и η_2 – механический и гидравлический КПД привода.

Определив из (15) теоретическую скорость движения машины и найдя величину буксования [5], можно оценить действительную скорость движения с учетом требований

безопасности. При этом необходимо учитывать и условия обеспечения требуемой производительности цепного бара как экскавирующего устройства непрерывного действия.

Список использованных источников

1. Топчиев, А.В. Горные машины: справочник / А.В. Топчиев, В.И. Ведерников. – М.: ГНТИ литературы по горному делу, 1960. – 384 с.
2. Солод, В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
3. Горные машины: учебное пособие в 2 ч. / Под общ. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – Ч. 1: Основы теории / Г.В. Казаченко [и др.]. – 183 с.
4. Копание и резание горных пород. – Банк учебных материалов Referatwork.ru 2009-2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://referatwork.ru/category/sport/view/444017_kopanie_i_rezanie_gornyh_porod. – Дата доступа: 01.02.2021.
5. Казаченко, Г.В. Взаимодействие опорных площадок ходовых устройств мобильных машин с несущим основанием / Казаченко Г.В. // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 50-55.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Поступила в редакцию 02.02.2021 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 691.175.6

Кудина Е.Ф.^{1,2}, Приходько И.В.¹¹УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь²Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь**СОВРЕМЕННЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕЦИКЛИНГА**

Аннотация. В статье проанализированы составы и свойства современных смазочных материалов. Сделан анализ достоинств и недостатков базовых масел и их влияния на свойства товарных масел. Приведены основные производители смазочных материалов и их вклад в мировое производство. Рассмотрены пластичные смазочные материалы, как одно из наиболее интересных и перспективных направлений в производстве смазочных материалов. Представлен анализ отработанных смазочных материалов в Республике Беларусь и мире, и перспективы их использования, а также возможности их рециклинга и перспективы создания на их основе смазочных материалов с принципиально новыми свойствами.

Ключевые слова: масла, смазочный материал, загуститель, присадка, пластичный смазочный материал, отработанный смазочный материал, рециклинг.

Kudina H.F.^{1,2}, Prihodzko I.V.¹¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus²V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems
of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus**MODERN LUBRICANTS:
DEVELOPMENT TRENDS AND PROSPECTS OF RECYCLING**

Abstract. The article analyzes the composition and properties of modern lubricants. The analysis of the main advantages and disadvantages of base oils and their influence on the main properties of commercial oils is made. The paper presents the main manufacturers of lubricants and their contribution to world production. The range of plastic lubricants is presented as one of the most interesting and promising directions in the production of lubricants. The analysis of used lubricants in the Republic of Belarus and the world and the prospects for their use, as well as the possibility of their recycling and the prospects for creating lubricants based on them with fundamentally new properties is presented.

Keyword: oils, lubricants, thickener, additive, plastic lubricant, waste lubricant, recycling.

Введение. Современное производство невозможно представить без машин и механизмов, а их работа, в свою очередь, связана с длительной эксплуатацией в тяжело-нагруженных условиях, что без использования смазочного материала (СМ) может привести к значительному износу, заклиниванию или заеданию взаимодействующих поверхностей и даже к выходу оборудования из строя. Для эффективной работы узла трения необходимо использовать СМ, соответствующий по составу и свойствам конструк-

ции, материалу и условиям эксплуатации. От устройства узла зависит тип используемого СМ – жидкий, пластичный или твердый. А еще выбор СМ в значительной степени связан с соотношением цена и качество, что напрямую зависит от свойств и стоимости входящих в его состав компонентов. Помимо того, необходимо учитывать уже ставшие достаточно распространенными такие агрессивные производственные факторы, как акустическое, вибрационное воздействия и электромагнитные поля на защитные свойства и срок эксплуатации СМ. Таким образом, разработка СМ со специальными свойствами и характеристиками на сегодняшний день является актуальной задачей.

Разновидности базовых масел. В настоящее время разработан значительный ассортимент СМ, которые являются сложными композиционными продуктами, состоящими из большого количества компонентов, обуславливающих их свойства [1]. Какой бы сложный не был состав СМ, его основой всегда является базовое масло (БМ). По назначению СМ делятся на моторные, промышленные, трансмиссионные, турбинные, энергетические и др., а по происхождению – на минеральные, синтетические и полусинтетические. Предназначены они для снижения трения и интенсивности изнашивания элементов трибосистем, защиты поверхностей трения от коррозии, уплотнения прецизионных трибосопряжений, отвода тепла и удаления продуктов износа из зоны

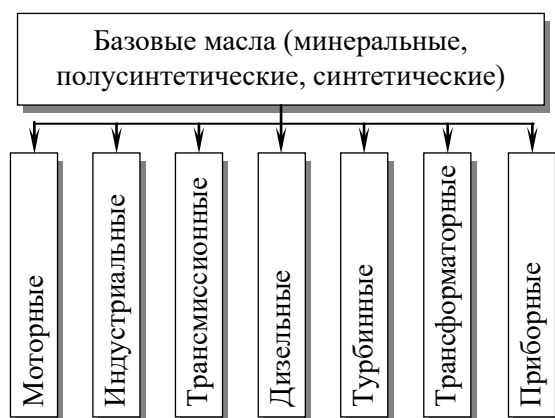


Рисунок 1. – Разновидности ТМ, получаемых на основе БМ

фрикционного контакта [2]. Целесообразность производства широкого ассортимента БМ экономически и технически не обоснована. В виду этого, нефтеперерабатывающие предприятия выпускают узкий диапазон БМ, которые в дальнейшем смешивают со специальными присадками и при необходимости между собой с целью создания товарных масел (ТМ), обладающих необходимыми свойствами (рисунок 1). Таким образом, производство ТМ включает в себя два этапа – изготовление БМ и процедуры модифицирования БМ целевыми добавками.

Одними из наиболее распространенных, в виду простоты получения и достаточно низкой стоимости, являются минеральные масла, содержащие парафиновые, а также ароматические, нафтеновые углеводороды и т.д. (рисунок 2). Серьезными недостатками как самих минеральных масел, так и СМ на их основе являются узкий температурный диапазон работы, низкие антикоррозионные свойства, а также высокая подверженность окислению (таблица 1) [3].

Современный рынок СМ характеризуется постоянным совершенствованием их составов и свойств. К примеру, мировой объем использования СМ на протяжении последних нескольких лет остается неизменным и составляет порядка 36 миллионов тонн [4], но тенденция использования отдельных видов СМ изменяется из года в год. Объясняется это следующими причинами:

- модернизация и совершенствование оборудования;
- возрастание длительности эксплуатации СМ;
- приоритет энергосберегающих СМ;
- ужесточение требований к экологической безопасности.

Вышеупомянутые факторы являются основными требованиями к разрабатываемым новым СМ. Однако, улучшение ряда характеристик СМ может привести к появлению некоторых недостатков. Долгое время значительный интерес вызывало увеличение

срока эксплуатации и улучшение антифрикционных и антикоррозионных свойств, что привело к созданию базовых синтетических масел (рисунок 2).

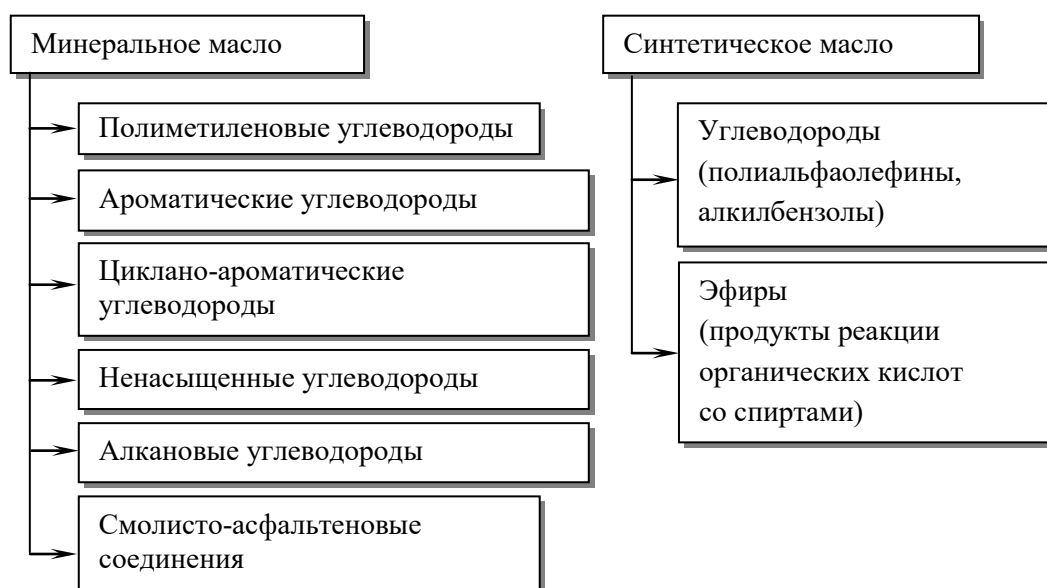


Рисунок 2. – Основной состав БМ

Таблица 1. – Рабочий диапазон температур

Базовое масло	Номинальный рабочий диапазон температур
Минеральные	
Парафиновое	от – 12 до +140 °С
Нафтенное	от – 35 до +120 °С
Синтетические	
Синтетические эфиры	от – 30 до +177 °С
Диэфир	от – 73 до +204 °С
Полиолэфир	от – 46 до +204 °С
Синтетический углеводород	от – 62 до +177 °С
Полиалкилен гликоль	от – 40 до +177 °С
Силиконовое	от – 73 до +232 °С
Флюорокремниевая	от – 46 до +232 °С
Перфлюоринированные полиэфиры	до +315 °С

Разработка синтетического масла позволила решить ряд проблем, но создала и новые трудности, связанные с усложнением производства и, соответственно, значительным возрастанием стоимости. Таким образом, перед специалистами по созданию СМ появилась новая задача – разработать новые высококачественные БМ, не уступающие синтетическим, но имеющие более низкую стоимость. Так в результате смешивания минеральных и синтетических масел появились полусинтетические БМ.

Полусинтетические масла перед минеральными имеют значительные преимущества: высокую стойкость к окислению, высокую термическую стабильность, низкую температуру застывания, низкую токсичность, улучшенную деэмульгирующую способность, низкую испаряемость.

Таким образом, в зависимости от базовой основы и стоимости может быть разработан целый спектр СМ, различающихся по условиям эксплуатации. В настоящее время лишь некоторые СМ содержат только одно БМ. Во-первых, потому что смесь

двух и более БМ с разными свойствами позволяет обеспечить СМ необходимые эксплуатационные характеристики. Во-вторых, полярные синтетические БМ часто используются в качестве присадок к менее полярным маслам. А в загущенных системах могут комбинироваться даже несовместимые базовые жидкости [3].

В настоящее время в связи с тем, что механизмы смазываются в основном однократно (при изготовлении и сборке), востребованы СМ с длительным ресурсом работы и расширенным диапазоном условий применения. Техника нового поколения выдвигает требования по увеличению продолжительности эффективной работоспособности СМ в значительно расширенном температурном диапазоне при возросших нагрузках и скоростях в узлах трения. При ужесточении требований все большее значение приобретают такие свойства СМ, как антиокислительная и механическая стабильность, коллоидная устойчивость во времени, а также трибологические характеристики.

Производство СМ. Основное производство СМ стран СНГ сосредоточено в России и на Украине. Ведущее место среди Украинских производителей СМ занимает ОАО «АЗМОЛ», а на территории Российской Федерации лидерами рынка СМ являются ПАО «Лукойл», который изготавливает около 45 % от всего объема технических СМ, а на втором и третьем местах находятся ПАО «НК «Роснефть» и ПАО «Газпром нефть», производящие соответственно 20 % и 14 % [4]. В последние годы наблюдается тенденция к увеличению объема производства БМ. Например, в 2014 г. было произведено 3,2 млн тонн, что на 13 % больше по сравнению с выработкой 2011 года. Следует учитывать, что чем выше качество ТМ, определяемых, прежде всего, качеством БМ, и, следовательно, чем более продолжителен срок их службы, тем меньший объем производства масел требуется в стране. Несмотря на относительно высокий уровень производства, Россия не может обойтись без импорта ТМ. Так, в 2014 году было импортировано 547 тыс. тонн СМ. Связано это с тем, что произведенные в Российской Федерации масла не обладают достаточно высоким качеством. Например, из произведенных в 2012 году 2,6 млн тонн БМ 97 % составили БМ I группы, 2 % – масла II группы, а доля III и IV групп составила всего 1 %. Общемировые показатели производства БМ за тот же год следующие: I группа – 64,4 %, II группа – 20 %, III группа – 5,4 %, IV группа – 0,9 % [5].

Наиболее известными зарубежными производителями СМ являются компании: Mannol, Shell, Castrol (Германия), Mobil (США), Total (Франция). Однако, сегодня на рынке можно встретить и СМ, произведенные в ближнем зарубежье, к примеру, компанией WEGO (Чехия), ADWA и ORLEN OIL (Польша). СМ зарубежного производства значительно дороже, производимых в СНГ, и если потребители для личных нужд пользуются более дорогой импортной продукцией, то в промышленной сфере и на производстве предпочтение отдается бюджетным техническим СМ.

На территории Республики Беларусь эффективно осуществляют переработку нефти два нефтеперерабатывающих завода (НПЗ): Мозырский НПЗ (ОАО «МНПЗ») и Новополоцкий НПЗ (ОАО «Нафтан»). В большом объеме налажено производство как уже готовых (легированных) СМ, так и БМ, которые реализуются, в том числе, и за рубежом. К примеру, «Нафтан» до 1991 г. перерабатывал около 25 млн тонн нефти в год. В настоящее время эта цифра составляет порядка 11 млн тонн в год. Из общего объема переработки на долю производства масел приходится около 3 %. Это одно из важнейших направлений работы предприятия, так как произведенная продукция (в количестве 20 тыс. тонн масел ежемесячно) удовлетворяет потребности промышленности Беларуси в индустриальных и гидравлических маслах. В рамках всего концерна «Белнефтехим» (в структуру которого входят НПЗ) спектр производимой продукции гораздо шире, и помимо индустриальных и гидравлических СМ выпускается еще целый ряд масел: тур-

бинные, для компрессоров и вакуумных насосов, для машин и сцепления зубов колес, минеральные неочищенные, моторные, смазочные для текстильных машин и т.д. [6].

Пластичные смазочные материалы. Отдельной категорией СМ являются пластичные смазочные материалы (ПСМ), занимающие промежуточное положение между твердыми и жидкими СМ [7]. Они представляют собой систему, состоящую из загустителя, образующего структурный каркас, ячейки которого заполнены дисперсионной средой (жидким смазочным материалом) и целевыми добавками (рисунок 3).

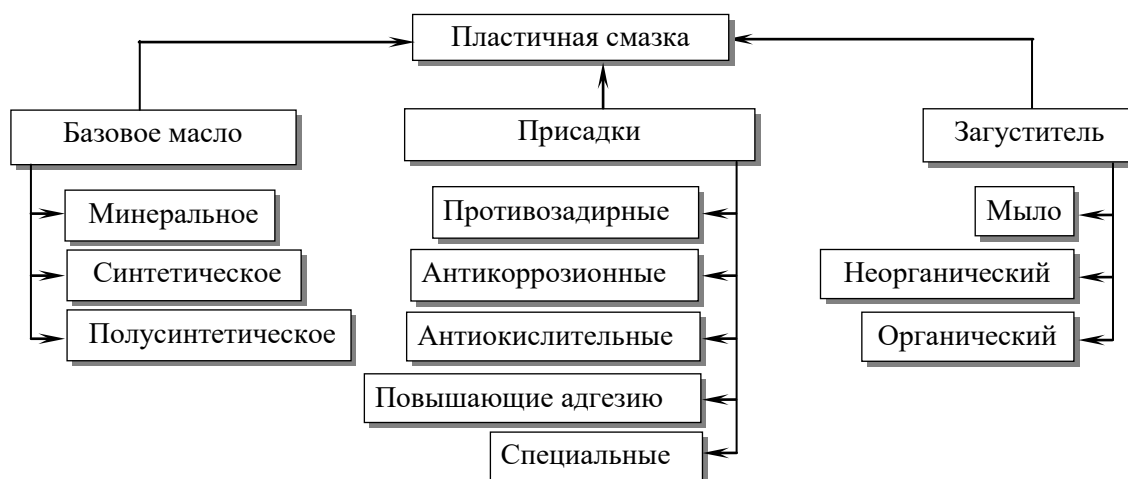


Рисунок 3. – Компоненты пластичных СМ

Основу ПСМ составляют минеральные, синтетические, полусинтетические, а иногда и растительные масла. Твердые углеводороды, соли высокомолекулярных жирных кислот (мыла), высокодисперсные силикагели и бентониты, а также другие продукты органического и неорганического происхождения используют в качестве загустителя. Важными компонентами ПСМ являются наполнители: графит, дисульфид молибдена, порошкообразные металлы или их окислы, а также присадки, улучшающие эксплуатационные характеристики. Устойчивость структурированной системы зависит от прочности структурного каркаса, силы взаимодействия между его отдельными частями (между элементами структурного каркаса и дисперсионной средой на границе раздела фаз), числа контактов частиц каркаса в единице объема, электростатических свойств и ряда коллоидно-химических факторов [8, 9].

По назначению и в соответствии с техническими требованиями среди ПСМ выделяется несколько основных групп (рисунок 4). В каждой группе можно выделить более мелкие подгруппы в связи с конкретной специализацией. К примеру, самая крупная и наиболее распространенная группа по области применения – это антифрикционные ПСМ, а самая узкая и наиболее специфическая группа ПСМ – узкоспециализированные (отраслевые). Мировое производство и потребление ПСМ на протяжении последних лет составляет около 3 % от общего потребления СМ. Большая часть ПСМ вырабаты-



Рисунок 4. – Классификация пластичных смазок

вается с использованием минеральных масел при незначительном постоянном увеличении доли смазок на синтетической основе. Особое внимание во многих странах уделя-

ется разработке, производству и потреблению высокотемпературных [10], а также био-разлагаемых ПСМ с дисперсионной средой на основе растительных масел или их производных [11]. В промышленно-развитых странах мира основным видом производимых ПСМ являются литиевые. В Японии их доля составляет 60 %, в странах Западной Европы и Северной Америки – 70 %, в Китае – 80 %. Производство литиевых смазок в России составляет всего лишь 34 % [7].

Самыми распространенными в постсоветских странах, вследствие значительного морального старения производства и оборудования, продолжают оставаться кальциевые смазки (гидратированные смазки и солидолы). Производство безводных кальциевых смазок, по своим характеристикам превосходящих гидратированные, освоено в Республике Беларусь. Основным производителем ПСМ в республике является ОАО «Завод горного воска». Ассортимент ПСМ завода в настоящее время представляют: СОЛИДОЛ-Ж, смазка графитная, ЦИАТИМ-201, смазка пушечная, а также канатные смазки марки КС-УН А, КС-УН В, КС-УНМ, ТОРСИОЛ-35Э-ЗГВ. Годовой объем выпуска только канатных смазок составляет более 36 тыс. тон. ПСМ такого типа в виду хорошей водо- и морозостойкости широко применяются для смазывания стальных канатов различного назначения и используются в узлах трения с невысокими рабочими температурами от -35°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Они обладают хорошими антифрикционными и антикоррозионными характеристиками. Но имеют ряд недостатков: низкую механическую стабильность и достаточно большое термоупрочнение, которые ограничивают область их использования. Помимо этого, на ОАО «Завод горного воска» запущен в 2010 г. цех по производству парафина нефтяного твердого мощностью 18 тыс. тонн в год. Данная продукция экспортируется в Бельгию, Болгарию, Германию, Молдову, Литву, Польшу, Румынию, Россию, Украину. ОАО «Завод горного воска» является монополистом в Республике Беларусь по производству парафина нефтяного твердого. Среди ассортимента, выпускаемого заводом ПСМ, присутствуют и литиевый ПСМ Литол-24. Его основу составляет минеральное БМ, загущенное литиевым мылом, с добавлением вязкостных и антиокислительных присадок [3]. Хотя производство Литол-24 налажено еще с 1994 года, объемы производства данного ПСМ намного ниже кальциевых.

Следует отметить, что ПСМ на литиевых мылах не всегда удовлетворяют требованиям спецификаций производителей автомобильной техники, однако достаточно интенсивно используются в области железнодорожного транспорта. В связи с этим их выделили в отдельную группу – железнодорожные смазки. За последние несколько десятков лет эксплуатации ассортимент ПСМ на литиевых мылах претерпел значительные изменения в сторону повышения эксплуатационных характеристик. Для буксовых роликовых подшипников железнодорожного подвижного состава и метрополитена в странах СНГ до последнего времени основными оставались морально устаревшие смазки ЛЗ-ЦНИИ и ЖРО, которые в последствии заменил ПСМ Буксол.

Буксол имеет более высокие объемно-механические, защитные и антифрикционные характеристики (таблица 2). Он обладает лучшими, по сравнению с ЖРО и ЖРО-М, вязкостными характеристиками при низких температурах, более высокой температурой каплепадения, оптимальными трибологическими и тиксотропными [12] свойствами. Таким образом, смазка Буксол заменила ранее используемые аналоги, так как при сопоставимой стоимости обладает более оптимальными физико-механическими свойствами. Буксол предназначен для эксплуатации в буксовых узлах при скоростях до 200 км/ч и рабочей температуре до 120°C . В реальных условиях скорости движения составов около 100 км/ч, а температура нагрева буксового узла – $60-80^{\circ}\text{C}$.

Таблица 2. – Характеристики пластичных смазочных материалов

Наименование показателя	Норма по ТУ	
	Буксол	ЖРО
Температура каплепадения, °С, не ниже	180	175
Пенетрация (при $T = 25\text{ °C}$), 10^{-1} мм	230-290	190-250
Коллоидная стабильность, %, не более	15	15
Предел прочности (при $T = 50\text{ °C}$), Па	300	350
Вязкость (при $T = -30\text{ °C}$ и $j = 10\text{ с}^{-1}$), Па·с, не более	1300	2000

Результаты исследований реологических и трибологических остаточных свойств отработанной пластичной смазки Буксол показали, что при таких условиях эксплуатации СМ не полностью вырабатывает свой ресурс и может послужить основой при создании СМ для тяжело нагруженных, но менее ответственных узлов трения после предварительной очистки и модернизации [13]. При этом Буксол, прошедший цикл эксплуатации, не единственный отработанный СМ, который можно использовать и уже используется в настоящее время в экономике Республики Беларусь, с целью снижения стоимостных расходов и улучшения экологической обстановки.

Сбор и рециклинг СМ. В производственной сфере и для личных нужд широко применяется весь ассортимент горюче-смазочных материалов. В Республике Беларусь каждый год в машиностроительной и транспортной отраслях, сельском хозяйстве, легкой и тяжелой промышленности потребляется не менее 100 тыс. тонн СМ, таких как индустриальные и автомобильные масла, ПСМ и смазочно-охлаждающие жидкости. Результатом их использования в рамках реализации экономической деятельности является ежегодное образование и накопление отработанных СМ, которые не могут обеспечить безопасную работу узла трения и подлежат замене. Некоторое количество отработанных масел образуется у населения в процессе эксплуатации автотракторной техники. Наряду с внушительным объемом использования ПСМ и СМ объем образующихся отработанных материалов составляет примерно 80-85 % от полного объема применяемых. До недавнего времени большая их часть сжигалась в качестве топлива и выбрасывалась в окружающую среду, что причиняет серьезный вред экологии и здоровью людей. Государства тратят огромные средства на восстановление здоровья людей и экологических последствий влияния бесконтрольного сжигания отработанных СМ. По определению классификатора отходов Республики Беларусь, отработанные СМ отнесены к третьему классу опасности или умеренно опасным. При попадании в окружающую среду в результате проливов при авариях или неправильного хранения они очень медленно разлагаются в результате биологических процессов. В случае техногенной аварии высокое загрязнение почвы, водной и воздушной сред может стать природной катастрофой [14].

Отработанные СМ, являющиеся отходами производства, в Беларуси по данным на начало 2018 года использовались следующим образом: около 34 % отработанных масел, используемых на предприятиях, сжигалось для получения энергии, 20 % использовалось на предприятии, вовлекалось в дальнейший оборот для менее ответственных технических нужд, и 46 % применялось для получения регенерированных масел и других нефтепродуктов [14]. Представленные данные свидетельствуют, что треть отработанных масел сжигается, в результате чего утрачиваются ценные отходы производства и нерационально используется такой природный ресурс, как нефть и продукты нефтепереработки. Отработанные СМ и ПСМ – это ценный продукт нефтепереработки, и со-

временные технологии позволяют их эффективно очистить, регенерировать и вовлечь в дальнейший хозяйственный оборот, что является наиболее рациональным способом их использования [15-17].

В Республике Беларусь применяется порядка 20 технологий, позволяющих переработать отработанные нефтепродукты для дальнейшего использования [15]. Существуют еще трудности по вовлечению в оборот отработанных СМ, находящихся в личном пользовании. Такие отходы потребления СМ пока слабо учитываются, так как в полной мере не налажена система их учета. Однако, если учитывать данные Белстат, то у Белорусов на 2019 г. в личном пользовании находится около 3 млн легковых автомобилей и принять во внимание, что в среднем при замене образуется около 5 литров отработанного СМ, то в целом по стране накапливается более 14 тыс. тонн отработанных СМ в год. И они не всегда качественно собираются и передаются на переработку. На практике лучшим вариантом является обращение на станцию техобслуживания, где сливается отработанное масло и заливается новое. Это значительно упрощает сбор и систематизацию отходов.

Разработанные новые технологии позволяют получать из отработанных масел восстановленные масла, пригодные для повторного использования, что решает экологическую проблему [18]. В последние десятилетия в Беларуси одним из основных направлений деятельности как Минприроды, так и других заинтересованных органов является создание и совершенствование системы обращения с отходами. Цели и задачи вовлечения отходов в хозяйственный оборот определены в законе «Об обращении с отходами» и Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития на период до 2020 года, в которой установлен приоритет использования отходов над их обезвреживанием и захоронением [15].

Решение проблемы переработки или утилизации отработанных СМ является проблемой для предприятий и в целом для Республики. Кроме этого, одной из основных задач современного производства является создание новых материалов при использовании дешевого сырья, полученного на основе отработанного СМ. Помимо утилизации отработанных СМ это позволит снизить финансовые затраты на приобретение материалов, необходимых для производства новой продукции, а также уменьшить энергетические затраты на ее производство и частично решить проблему импортозамещения. Однако, возврат в оборот СМ имеет ряд трудностей в своей реализации. Отработанный СМ, взятый из различных источников, может иметь как разный состав (смесь различных масел), так и различный остаточный ресурс и, в связи с этим, обладать различными свойствами, что является серьезным препятствием для его дальнейшего использования. Помимо этого, отработанные СМ безвозвратно утрачивают первоначальные свойства как в процессе применения, так и регенерации, в лучшем случае могут быть восстановлены только свойства БМ. В случае переработки обычных минеральных масел ценность регенерированных продуктов лишь немного выше по сравнению со стоимостью энергетических затрат [19].

В связи с вышеизложенным, необходим комплексный подход в оценке остаточного потенциала СМ и решении задачи по получению в процессе очистки и регенерации материала, который можно использовать как основу для нового СМ, и, возможно, уже совсем для других целей, например, не как антифрикционные СМ, а как консервационные или СМ со специальными свойствами. Кроме этого, регенерированные СМ можно использовать в качестве пластификаторов композиционных полимерных материалов [19].

Наиболее специфической разновидностью СМ, в меньшей степени связанных с процессом трения, являются энергетические масла, электропроводящие и электрокон-

тактные ПСМ. Отработанные СМ, прошедшие стадию механической очистки и кислотного осаждения продуктов механо- и термоокислительной деструкции, могут быть использованы как основа СМ со специальными свойствами, к примеру энергетические, среди которых можно выделить в отдельную группу электроизоляционные СМ: трансформаторное; конденсаторное; кабельное.

Такие СМ, в основном, являются жидкими диэлектрическими материалами, которые обеспечивают изоляцию токоведущих частей электрического оборудования и осуществляют теплообмен, а в случае образования в ходе технологического процесса электрической дуги выступают в качестве дугогасящей среды. Энергетические масла также могут использоваться в узлах трения турбогенераторов и компрессоров [8].

В ряде случаев к ПСМ предъявляют специальные требования, например, выполнение роли токопроводящих материалов. В качестве средств стабилизации электрического сопротивления разборных контактных соединений применяются электропроводящие СМ. Как показывает практика, значительный перегрев электрических контактов часто является причиной отказов электрического оборудования, иногда приводящих и к возгоранию. При проведении тепловизионных обследований подстанций отмечена тенденция перегревов разборных контактных соединений электрических аппаратов и проводников внешней цепи [20]. Существует ряд средств, позволяющих снизить и стабилизировать величину переходного сопротивления контактов, к примеру, тарельчатые пружины, крепежи из цветного металла и т.д. Однако данные мероприятия дороги и поэтому часто не проводятся на действующих объектах. В связи с этим допускается использование более дешевого варианта стабилизации сопротивления разборных контактов – применение электропроводящего СМ (ЭПС-150, ЭПС-98, ЭПС-200 и т.д.). В состав данного СМ входят: минеральное масло, высокодисперсный металлический порошок (медь или никель), а также присадки в виде неорганической тиксотропной добавки и стабилизирующие компоненты.

Материал снижает переходное сопротивление в десятки раз и стабилизирует его в диапазоне температур от -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Это позволяет значительно снизить потери электроэнергии, особенно при применении в массовом количестве, а также защитить контакты от многократных и длительных перегрузок по току и коррозии.

Разъемные соединения элементов электрооборудования в силу того, что могут быть выполнены из разных материалов (алюминиевые, медные или стальные), должны проходить специальную подготовку перед монтажом и подвергаться специальному обслуживанию в процессе эксплуатации, поскольку способны активно окисляться и в связи с этим менять свойства. Такая подготовка представляет собой механическую зачистку поверхности алюминиевых контактов от быстрообразующейся в присутствии кислорода оксидной алюминиевой пленки. Удаление оксидной пленки проводится абразивными частицами под слоем защитного СМ или защитной пасты. СМ или пасты должны обладать: хорошей адгезией и способностью наноситься на металлическую поверхность тонким слоем; хорошей эластичностью и быть достаточно устойчивыми к колебаниям температуры. А главное, они должны быть стойкими к воздействию щелочей и кислот, и не допускать коррозионного повреждения защищаемых поверхностей, т.е. являются материалами протекторного типа. К таким СМ можно отнести технический вазелин, смазку ЦИАТИМ и т.д.

Перечисленные специализированные СМ обладают хорошими технологическими характеристиками, однако производятся, в основном, в странах ближнего и дальнего зарубежья.

Выводы. В настоящее время СМ представлены в широком ассортименте и имеют разные эксплуатационные характеристики. Однако, в большинстве случаев, работа

современной техники подразумевает наличие и дальнейший стремительный рост скоростей, возрастание нагрузок, значительных виброакустических воздействий, а также других экстремальных условий эксплуатации. Развитие и совершенствование техники порождает новые проблемы и трудности в реализации безотказной работы машин, механизмов и оборудования. В связи с этим возрастает потребность в узкоспециализированных СМ, способных значительно повысить срок службы техники и снизить воздействие вредных факторов в условиях эксплуатации. Таким образом, все это служит условиями для совершенствования рецептур создаваемых СМ. Важным и достаточно интересным направлением в производстве СМ остается рециклинг отработанных СМ и ПСМ. Развитие этого направления позволит эффективно использовать сырьевую базу, снизить затраты на приобретение нефтепродуктов и в целом улучшить экологическую обстановку. Полученные в процессе восстановления БМ послужат основой для новых специальных СМ и ПСМ, востребованных в рамках современных требований к эксплуатационным свойствам и конкретным приложениям, которые в зависимости от поставленной задачи могут обладать либо высокими диэлектрическими свойствами, либо значительной проводимостью, а также снижать виброакустическое воздействие как от внешних источников, так и непосредственно от смазываемого объекта.

Список использованных источников

1. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочное издание / К.М. Бадыштова [и др.]; под ред. В.М. Школьников. – М.: Химия, 1989. – 432 с.
2. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах: учебник для вузов / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Вышэйшая школа, 1999. – 374 с.
3. Манг, Т. Смазки. Производство, применение, свойства: справочник / Т. Манг, У. Дрезель; под ред. В.М. Школьников. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 944 с.
4. Компания смазочных материалов ООО «ЛЛК-Интернешнл» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lukoil-masla.ru/about>. – Дата доступа: 01.12.2020.
5. Гиматдинов, Р.Р. Состояние производства базовых масел в России / Р.Р. Гиматдинов, Р.З. Фахрутдинов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 11. – С. 58-62.
6. Про белорусское моторное масло – DRIVE2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.drive2.ru/b/455718158850853171>. – Дата доступа: 01.12.2020.
7. Любинин, И.А. Состояние и перспективы производства пластичных смазок в России и странах СНГ / И.А. Любинин // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 3. – С. 3-6.
8. Влияние дисперсных органокремнеземов на триботехнические характеристики смазок / Е.Ф. Кудина [и др.] // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 5. – С. 547-553.
9. Влияние высокодисперсных органоминеральных наполнителей на температурные характеристики смазочных композиций / Е.Н. Волнянко [и др.] // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 2. – С. 232-235.
10. Механизм структурообразования дисперсной фазы биоразлагаемой литий-кальциевой смазки / В.И. Жоргик [и др.] // Актуальные вопросы машиностроения. – 2019. – № 8. – С. 325-328.
11. Синицин, В.В. Пластичные смазки СССР / В.В. Синицин. – М.: Химия, 1984. – 192 с.
12. Приходько, И.В. Защитные смазочные материалы для нужд транспортного машиностроения / И.В. Приходько // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 1. – С. 66-73.

13. Модификатор трения: пат. 2599005 РФ, МПК С10М169/04, С10М125/02, С10Н30/06 / А.С. Неверов, И.В. Приходько, В.В. Макеев, А.П. Приходько; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № 2015106096/04; заявл. 20.02.15; опубл. 10.10.16 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2016. – Бюл. № 28. – 6 с.
14. Новостной Интернет-портал БелТА: Государственная политика в области обращения с отходами отработанных масел: экология и экономика [Электронный ресурс]. – Минск, 2015. – Режим доступа: <https://www.belta.by/roundtable/view/gosudarstvennaja-politika-v-oblasti-obraschenija-s-othodami-otrabotannyh-masel-ekologija-i-ekonomika-793>. – Дата доступа: 01.12.2020.
15. Поташников, Ю.Н. Утилизация отходов производства и потребления / Ю.Н. Поташников. – Тверь: Изд-во ТГТУ, 2004. – 107 с.
16. Комплексная схема переработки отработанных масел и смазок / А.Ю. Евдокимов [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1990. – № 1. – С. 28-31.
17. Юнусов, М.Ю. Влияние глубины очистки дисперсионной среды на качество пластичных смазок / М.Ю. Юнусов, А.А. Джамалов, А.Б. Бадалов // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 16 сессии Шурой Оли Республика Таджикистан (12 созыва) и ее исторической значимости в развитии науки и образования. – Душанбе: ТГУ, 2002. – С. 32-35.
18. Бондалетова, Л.И. Полимерные композиционные материалы / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 118 с.
19. Способ очистки отработанного синтетического моторного масла: пат. 2529858 РФ, МПК С10М175/00, С10G25/00 / В.В. Остриков, Н.Н. Тупотилов, А.Ю. Корнев, В.И. Вигдорович, И.Н. Шихалев; заявитель ГНУ «ВНИИТиН Россельхозакадемии». – № 2013130787/04; заявл. 04.07.13; опубл. 10.10.14 // Федеральная служба по интеллектуальной собственности. – 2014. – Бюл. № 28. – 5 с.
20. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования: ГОСТ 10434-82. – Введ. 01.01.83. – Минск: Госстандарт, 2011. – 3 с.

Информация об авторах

Кудина Елена Федоровна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Водоснабжение, химия и экология», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: kudina_mpri@tut.by.

Приходько Иван Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией «Электрические и электронные системы» ИЦ ЖТ БелГУТа, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: iv_prihodko@mail.ru.

Information about the authors

Kudina Helen Fedorovna – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of the “Water supply, chemistry and ecology”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: kudina_mpri@tut.by.

Prihodzko Ivan Vasilyevich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the “Electrical and electronic systems”, Laboratory of the Test Center, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: iv_prihodko@mail.ru.

Поступила в редакцию 02.12.2020 г.

УДК 622.765:541.8

Можейко Ф.Ф., Поткина Т.Н., Шевчук В.В.*ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси», г. Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ КАРБОКСИМЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ФЛОТАЦИИ КАЛИЙНОЙ РУДЫ**

Аннотация. Изучено влияние карбоксиметилцеллюлозы различной степени полимеризации и этерификации макромолекул на показатели флотации калийной руды. Показано, что депрессирующее и флокулирующее действие карбоксиметилцеллюлозы зависит в основном от химической природы этого соединения и структуры его молекул в растворе. Лучшей модифицирующей способностью при флотации калийных солей обладают образцы карбоксиметилцеллюлозы со средней степенью полимеризации (400-500) и высокой степенью замещения (70-90).

Ключевые слова: флотация, сильвинитовая руда, карбоксиметилцеллюлоза, степень этерификации, степень полимеризации, депрессирующее действие.

Mozheyko F.F., Potkina T.N., Shevchuk V.V.*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Belarus***INFLUENCE CARBOXYMETHYL CELLULOSE OF DIFFERENT
CHEMICAL NATURE ON POTASSIUM ORE FLOTATION
QUALITATIVE CHARACTERISTICS**

Abstract. The effect of carboxymethyl cellulose of various degrees of polymerization and esterification of macromolecules on the flotation parameters of potash ore has been studied. It has been shown that the depressing and flocculating effect of carboxymethylcellulose depends mainly on the chemical nature of this compound and the structure of its molecules in solution. Carboxymethyl cellulose samples with an average degree of polymerization (400-500) and a high degree of substitution (70-90) have the best modifying ability for the flotation of potassium salts.

Keywords: flotation, sylvinite ore, carboxymethyl cellulose, degree of esterification, degree of polymerization, depressing effect.

Введение. Отличительной особенностью Старобинского месторождения калийных руд от других аналогичных в мире (исключая Эльзаское во Франции, которое в настоящее время практически полностью выработано) является повышенное количество в нем глинисто-карбонатных примесей нерастворимого остатка (н.о.). Если в большинстве промышленных пластов крупнейших в мире Саскачеванского и Верхнекамского месторождений калийных солей в Канаде и России, главных конкурентов Республики Беларусь по экспорту калийных удобрений на мировой рынок, содержание вредных примесей составляет всего 0,5-2,0 %, то даже в лучшем по составу 2-ом калиеносном горизонте Старобинского месторождения среднее содержание н.о. составляет 4-5 %, в 3-ем – 6-8 %, а в первом горизонте среднее содержание н.о. составляет 18 %. Такое повышенное содержание нерастворимых примесей, особенно глинистых минералов, диспергирующихся в жидкой среде до тончайших частиц (меньше 5 микрон), существенно усложняет процесс обогащения руды и повышает стоимость получения калийных удобрений из руд Старобинского месторождения. Известно [1-3], что основной причиной депрессирующего действия глинистых частиц при флотации калийных солей является

преобладающая адсорбция на их поверхности катионоактивных реагентов-собирателей (жирных аминов). Она обусловлена интенсивным взаимодействием ионогенных групп аминов с поверхностью глинистых минералов, содержащей нескомпенсированные адсорбционно-активные центры.

Для устранения отрицательного влияния глинистых примесей на процесс флотации калийных солей применяют различные способы: механическое выделение глинистых примесей из тонкоизмельченной руды перед основной флотацией, обработку глинисто-солевых суспензий специальными реагентами-модификаторами, экранирующими поверхность глинистых частиц и предотвращающими повышенную адсорбцию на них реагентов-собирателей, флотационное отделение глинистых примесей перед основной флотацией полезного минерала с обработкой их реагентами-коллекторами, а также различные комбинации этих способов. Применение того или иного способа определяется, прежде всего, вещественным составом глинистых примесей, содержанием их в руде, распределением их по крупности, а также технико-экономическими показателями переработки полезных ископаемых.

Необходимо отметить, что даже после тщательного проведения подготовительных работ по отделению тонкодисперсных глинистых частиц сильвинитовая руда, обесшламленная любым из известных методов или их комбинацией, перед подачей на основную сильвинитовую флотацию должна быть обработана защитными реагентами-модификаторами, устраняющими или частично предотвращающими адсорбцию катионных собирателей на глинистых шламах и обеспечивающих высокую адсорбцию на сильвине (KCl). В работах [4, 5] отмечено, что глинистые шламы поглощают из флотационной суспензии практически весь вводимый (даже в большом количестве) для флотации собиратель октадециламин. Это приводит к почти полному затуханию флотационного процесса, а из-за повышенного расхода собирателя и получения очень загрязненного глинистыми шламами некондиционного концентрата процесс флотации становится затратным.

При обогащении калийных солей флотационным способом конечной стадией, при которой практически полностью подавляется адсорбция катионных реагентов-собирателей на глинисто-карбонатных частицах, является обработка глинисто-карбонатных суспензий, подаваемых на основную флотацию, специальными защитными реагентами-модификаторами. В качестве последних применяют различные соединения, в основном органические, в т.ч. карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ).

На многих предприятиях горно-обогатительной промышленности КМЦ, применяемая в качестве реагента-депрессора при флотационном обогащении руд, является сложным полидисперсным продуктом. Различные партии этого продукта отличаются как по степени полимеризации, так и этерификации. Поэтому представляло интерес определить влияние этих величин на депрессирующие свойства КМЦ и на эффективность процесса обезвоживания отходов производства калийных комбинатов.

Результаты исследований. Для исследований использовались образцы технической, дважды очищенной в метиловом спирте КМЦ. Степень этерификации ее определялась урановым весовым методом, а степень полимеризации – по методу Вурца. Опыты по флотации калийной руды Старобинского месторождения проводились во флотомашине механического типа «Механобр» с емкостью камеры 150 см² при Ж:Т, равном 3,0. Результаты флотационных опытов представлены в таблице 1.

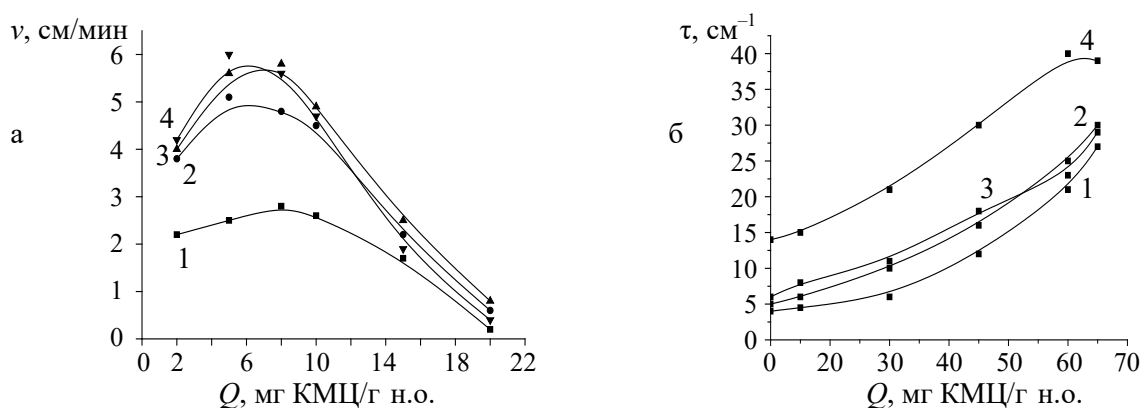
Из приведенной таблицы видно, что молекулярный вес КМЦ, наряду с ее степенью этерификации, является одним из главных факторов при оценке депрессирующего действия этого полимера на глинистые шламы калийных руд. При постоянном расходе депрессора показатели флотационного разделения калийной руды закономерно улуч-

шаются с ростом степени полимеризации реагента. Образцы КМЦ со степенью полимеризации 485 обладают наибольшей селективностью действия. Дальнейшее повышение степени полимеризации выше 500 приводит к ухудшению депрессирующего действия КМЦ.

Таблица 1. – Зависимость извлечения КСI в концентрат от расхода различных образцов КМЦ (собиратель – октадециламин, 100 г/т руды; содержание в руде КСI – 23,5 %, н.о. – 4,4 %)

Степень полимеризации	этерификации	Извлечение КСI в концентрат, % при расходе КМЦ, г/т			
		50	100	200	300
242	72,3	29,6	71,4	95,4	96,4
412	71,0	48,8	81,3	96,6	96,4
485	69,5	56,1	89,1	96,4	96,2
545	70,0	52,8	69,1	95,4	95,3
721	82,0	23,8	61,3	95,2	95,2
790	84,5	–	30,5	90,4	95,0

Депрессирующее действие высокомолекулярных полиэлектролитов типа КМЦ основано на флокулирующем и гидрофилизирующем эффекте этих реагентов. Введение в глинисто-солевую суспензию даже небольшого количества КМЦ вызывает образование флоккул, поверхность которых в сотни и тысячи раз меньше поверхности первичных глинистых частиц. Последующая адсорбция КМЦ на поверхности образовавшихся флоккул усиливает их гидрофилизацию. По-видимому, основной причиной лучшего депрессирующего действия высокомолекулярных образцов КМЦ является их более высокое флокулирующее действие. Из рисунка 1а видно, что скорость осветления глинистых суспензий, обработанных КМЦ, закономерно увеличивается с ростом степени полимеризации этого реагента.

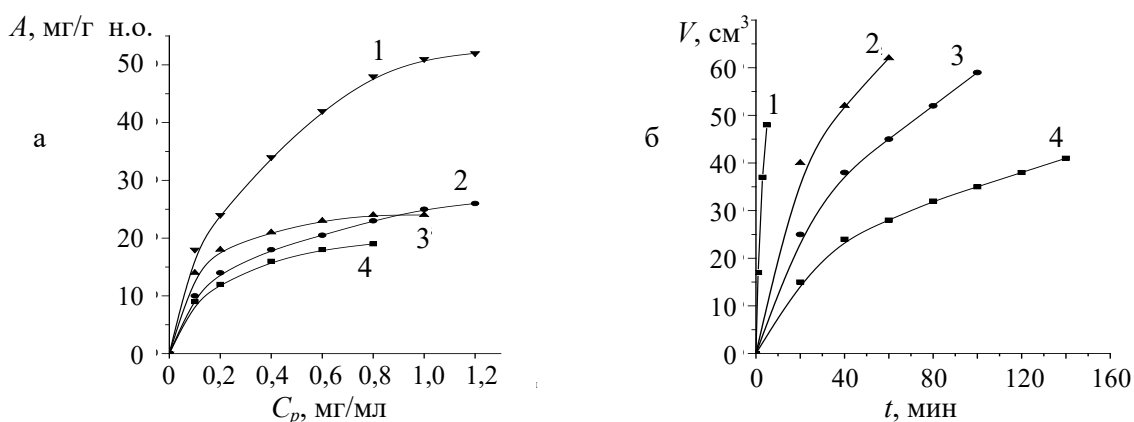


а: 1 – $n = 200$; 2 – 600; 3 – 721; 4 – 827; б: 1 – $\gamma = 75$; 2 – 83,1; 3 – 93; 4 – $\gamma = 90$

Рисунок 1. – Зависимость скорости v осветления (а) и мутности τ (б) 3 %-ной глинистой суспензии от расхода КМЦ Q различной степени полимеризации n и этерификации γ

Растворимость высокомолекулярных соединений зависит от природы и местоположения гидрофильных групп, от длины молекулы и других факторов. При прочих равных условиях растворимость высокополимеров заметно падает с ростом их молекулярного веса и особенно от добавок электролитов. При высоких концентрациях солей КСI и NaCl во флотационной пульпе происходит подавление диссоциации ионогенных

групп полимера и частичная их дегидратация, что вызывает ассоциирование и агрегирование макромолекул КМЦ, а для образцов с высоким молекулярным весом – и частичное высаливание. Следствием этого является уменьшение сплошности адсорбционного слоя КМЦ на поверхности глинистых частиц, в то время как величина адсорбции с увеличением молекулярного веса КМЦ на солёных глинах возрастает (рисунок 2а). Такое несоответствие между величиной адсорбции различных образцов этого полимера и их депрессирующим действием вызвано тем, что макромолекулы КМЦ с низкой степенью этерификации на поверхности н.о. адсорбируются преимущественно в виде глобул и ассоциатов, занимающих меньшую поверхность, чем неассоциированные макромолекулы. Неупорядоченное расположение адсорбированных на глинистых частицах ассоциатов макромолекул КМЦ снижает плотность защитного гелеобразного слоя, обеспечивая, таким образом, лучший доступ реагента-собираателя к поверхности н.о. Следствием этого является снижение извлечения КСІ в концентрат.



а: 1 – $n = 484$, $\gamma = 43$; 2 – $n = 485$, $\gamma = 70$; 3 – $n = 415$, $\gamma = 71$; 4 – $n = 242$, $\gamma = 72,3$;

б: 1 – $\gamma = 49$; 2 – $72,3$; 3 – 79 ; 4 – $\gamma = 93$; V – объем осветленного слоя за время t

Рисунок 2. – Зависимость адсорбции КМЦ A различной степени полимеризации n и этерификации γ на глине от равновесной концентрации растворов полимера C_p (а); кривые фильтрации 20 %-ных глинистых суспензий, обработанных 20 мг КМЦ/г н.о. различной степени этерификации γ (б)

Как видно из рисунка 2а (кривые 1 и 2), при одинаковой степени полимеризации КМЦ на солёных глинах значительно лучше адсорбируются образцы с более низкой степенью этерификации. В то же время депрессирующее действие этого полимера ухудшается с уменьшением степени этерификации (таблица 1). Наличие в составе макромолекул большого числа карбоксильных групп обеспечивает им хорошую развёрнутость. Вытянутые с большей асимметрией макромолекулы КМЦ образуют более плотные защитные оболочки на глинистых частицах, чем макромолекулы, свернутые в клубки, и ассоциаты молекул.

Образование на поверхности н.о. защитных гидрофильных оболочек является одной из причин снижения скорости осветления суспензий при высоком содержании КМЦ (рисунок 1а). При этом связи между отдельными частицами внутри флоккул ослабляются, и они при воздействии даже незначительного перемешивания легко разрушаются. Тонкодисперсные глинистые частицы, возникшие при распаде их флоккул, распределяются под действием микропотоков по всему объёму суспензии, в результате чего устойчивость суспензии увеличивается. На рисунке 1б показана зависимость мутности осветленного слоя суспензии от концентрации различных образцов КМЦ, имею-

ших примерно одинаковую степень полимеризации, но разную степень этерификации. Из рисунка следует, что особенно мутные слои осветленной суспензии образуются при использовании высокоэтерифицированных образцов КМЦ.

Наличие в обратном солевом растворе тонкодисперсных глинистых частиц ухудшает избирательность действия применяемых флотореагентов, а также снижает скорость фильтрации глинисто-солевых отходов. Из данных рисунка 2б видно, что с увеличением степени этерификации КМЦ скорость фильтрации обработанных суспензий уменьшается. Это вызвано тем, что в процессе фильтрации суспензии тонкодисперсные частицы н.о., образовавшиеся при обработке суспензий КМЦ с высокой степенью этерификации, уменьшают пористость сформировавшегося осадка, препятствуя, таким образом, прохождению жидкости через него.

Конформация молекул полиэлектролитов в значительной мере зависит от концентрации полимера в растворе. С разбавлением раствора увеличивается диссоциация ионизированных групп полиэлектролитов, усиливается отталкивание между подобно заряженными участками цепи, что вызывает более полное растяжение ее. Напротив, при увеличении концентрации полиэлектролита в растворе, вследствие уменьшения диссоциации и ослабления межмолекулярного кулоновского отталкивания, происходит сворачивание цепей и образование глобул.

Прочность закрепления вытянутых молекул полимера на частицах н.о., вследствие большого количества свободных гидроксильных и карбоксильных групп, выше, чем в случае адсорбции глобул, поэтому степень покрытия частиц глины вытянутыми молекулами полимера более высокая. Следовательно, уменьшение концентрации полимера в растворе при разбавлении его водой должно положительно отразиться на его депрессирующем действии.

Таблица 2. – Зависимость извлечения KCl в концентрат от расхода и концентрации исходных растворов КМЦ (степень полимеризации – 484, степень этерификации – 49, содержание в руде KCl – 21,9 %, содержание н.о. – 3,3 %)

Концентрация раствора КМЦ, %	Извлечение KCl в концентрат, % при расходе КМЦ, г/т руды			
	50	100	200	300
1,0	16,3	67,7	90,1	95,1
0,5	33,3	76,6	90,9	95,4
0,25	40,1	78,8	95,1	95,6
0,1	49,1	85,5	96,1	97,8

Данные, приведенные в таблице 2, показывают, что депрессирующая способность КМЦ улучшается по мере разбавления ее растворов. Однако на практике введение сильно разбавленных водных растворов депрессора в солевую пульпу нежелательно, так как вследствие разбавления насыщенных солевых растворов нарушается водный баланс флотационной фабрики. Указанный недостаток можно исключить при разбавлении концентрированных растворов реагента раствором, насыщенным по KCl и NaCl. Положительный же эффект при этом несколько меньший. Так, при одном и том же расходе КМЦ извлечение KCl в концентрат составляет при использовании 0,25 %-ного водного раствора депрессора 95 %, а при использовании солевого раствора той же концентрации – 84 %.

Вывод. Таким образом, опытные данные позволяют заключить, что депрессирующее и флокулирующее действие карбоксиметилцеллюлозы обуславливается в основном химической природой этого соединения и структурой его молекул в рас-

творе. Лучшей депрессирующей способностью обладают образцы КМЦ с высокой степенью этерификации (70-80) и средней степенью полимеризации (400-500). Эффективность депрессирующего действия КМЦ можно повысить путем разбавления ее растворов до 0,25-0,10 %-ной концентрации.

Список использованных источников

1. Желнин, А.А. Теоретические основы и практика флотации калийных солей / А.А. Желнин. – Л.: Химия, 1973. – 184 с.
2. Титков, С.Н. Обогащение калийных руд / С.Н. Титков, А.И. Мамедов, Е.И. Соловьев. – М.: Недра, 1982. – 215 с.
3. Тетерина, Н.Н. Основные закономерности и технология флотационного обогащения сильвинитовых руд: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.08 / Н.Н. Тетерина. – М., 1985.
4. Физикохимия селективной флотации калийных солей / Х.М. Александрович [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1983. – 271 с.
5. Можейко, Ф.Ф. Регулирование коллоидно-химических свойств глинисто-солевых дисперсий: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.11 / Ф.Ф. Можейко. – Минск, 1983. – 462 л.

Информация об авторах

Можейко Фома Фомич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук.

Поткина Татьяна Николаевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Беларусь), e-mail: potkina@igic.bas-net.by.

Шевчук Вячеслав Владимирович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор химических наук, заведующий лабораторией минеральных удобрений, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси» (ул. Сурганова, 9/1, 220072, г. Минск, Беларусь), e-mail: shevchukslava@rambler.ru.

Information about the authors

Mozheyko Foma Fomich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry).

Potkina Tatyana – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Belarus), e-mail: potkina@igic.bas-net.by.

Shevchuk Viacheslav – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Chemistry), Head of the laboratory of mineral fertilizers, Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Belarus), e-mail: shevchukslava@rambler.ru.

Поступила в редакцию 24.11.2020 г.

УДК 620.174:666.3.046.4

Павленко А.П., Ахраменко Н.А., Буй М.В.*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ**

Аннотация. В настоящей статье рассмотрены некоторые аспекты процесса спекания алюмооксидной керамики различного состава. Определены режимы термообработки и условия спекания, позволяющие получить изделия с наилучшими механическими свойствами, плотной и однородной структурой, наибольшей износостойкостью.

Ключевые слова: керамика, структура, износостойкость, плотность, твердость, спекание.

Pavlenko A., Akhramenko N., Bui M.*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***DETERMINATION OF OPTIMAL CONDITIONS OF SINTERING
OF CORUNDUM CERAMIC PRODUCTS**

Abstract. In this article, some aspects of the sintering process of aluminum oxide ceramics of various compositions are considered. The heat treatment modes and sintering conditions are determined, which make it possible to obtain products with the best mechanical properties, dense and homogeneous structure, and the greatest wear resistance.

Keywords: ceramics, structure, wear resistance, density, hardness, sintering.

Введение. Техническая керамика широко используется в производстве износостойких узлов триботехнического назначения, электроизоляционных и конструктивных изделий. Изделия из технической керамики успешно конкурируют с изделиями из других материалов в условиях, где первостепенное значение имеют такие свойства материалов, как твердость, механическая прочность, термостойкость, износостойкость, в частности, в триботехнике. Это различного вида подшипники скольжения, опорные подшипники, кольца в торцевых уплотнениях компрессоров и жидкостных насосов, уплотнительные втулки в жидкостных насосах, различного вида уплотнительные устройства в кранах, шиберах и т.д. [1]. Большое распространение техническая керамика получила в различного рода нитеводителях и направляющих роликах, что определено их высокой износостойкостью. Одним из направлений успешного использования керамики является футеровка керамическими вставками различных валов и барабанов, мельниц.

Изделия из вышеуказанных материалов изготавливают по традиционной керамической технологии, которая включает следующие основные этапы [2]:

- подготовка керамических (стекольных) порошков;
- приготовление формовочных масс (литейных или прессовочных);
- формование изделий (в зависимости от размеров и сложности форм методами горячего литья под давлением или сухого и полусухого прессования);
- выжигание технологической связи;
- спекание с целью формирования сплошной структуры и достижения требуемых свойств материалов;
- химическая или механическая обработка изделий с целью получения требуемой поверхности.

Технологические процессы подготовки керамических порошков, приготовления формовочных масс, формования изделий и выжигания технологической связки из них подробно рассмотрены в работах [1-3].

В настоящей работе предполагается рассмотреть некоторые особенности процесса спекания алюмооксидной керамики, влияние температурных и временных режимов на некоторые свойства, структуру и износостойкость спеченных материалов. Главной целью работы является получение керамических материалов с наибольшей износостойкостью.

Определение режимов спекания для получения оптимальных свойств керамических материалов.

Для достижения заявленной цели рассмотрено влияние условий спекания на свойства различных алюмооксидных материалов:

- а) керамического материала ВК94-1, (Al_2O_3 – 94 %), содержащего в качестве активаторов спекания оксиды марганца, хрома и кремния;
- б) керамического материала Микролит, содержащего 99 % оксида алюминия;
- в) керамического материала ВК97-1, (Al_2O_3 – 97 %), содержащего в качестве активатора спекания оксид бора;
- г) керамического материала Oxal (Чехия) (состав не разглашается).

Образцы формовали методом полусухого прессования порошков керамики, содержащих 3 мас. % связки на основе ПВС. Спекание в воздушной среде проводили в электрической печи СВК 5163.00.00.00, оснащенной хромитлантановыми нагревателями, в вакууме – в вакуумной электрической печи СШВ-1.2,5/25-И2, оснащенной вольфрамовыми нагревателями. Свойства материалов, полученных по оптимальным режимам, приведены в таблице.

Таблица. – Свойства корундовой керамики, спеченной в различных средах

Обозначение образца	Материал	Среда спекания	Температура, °C	Время, час	Плотность, г/см ³	Водопоглощение, %	Прочность на изгиб σ , МПа	Твердость, HRA	Износ, мм
1	ВК94-1	воздух	1550	4	3,76	0,05	185	84	1,2
2	ВК94-1	воздух	1600	4	3,78	0,05	178	85	1,3
3	ВК94-1	вакуум	1550	3	3,83	0,03	234	86	0,9
4	ВК94-1	вакуум	1550	4	3,85	0,03	225	85	1,1
5	ВК97-1	вакуум	1550	3	3,89	0,10	233	-	1,7
6	ВК97-1	воздух	1550	3	3,76	0,10	220	-	1,1
7	ВК97-1	вакуум	1550	4	3,86	0,05	234	86	1,0
8	Oxal	воздух	1600	3	3,80	0,10	226	74	1,6
9	Oxal	газовая печь	1600	4	3,85	0,02	238	89	1,1
10	Микролит	вакуум	1650	3	3,76	0,06	220	89	1,6

Известно, что условия спекания и температурно-временной режим оказывают большое влияние на свойства спеченных материалов [4]. Согласно полученным в работе результатам, плотность, механическая прочность и твердость выше у материалов, спеченных в условиях вакуума, чем у полученных спеканием в воздушной (окислительной) среде независимо от состава керамики.

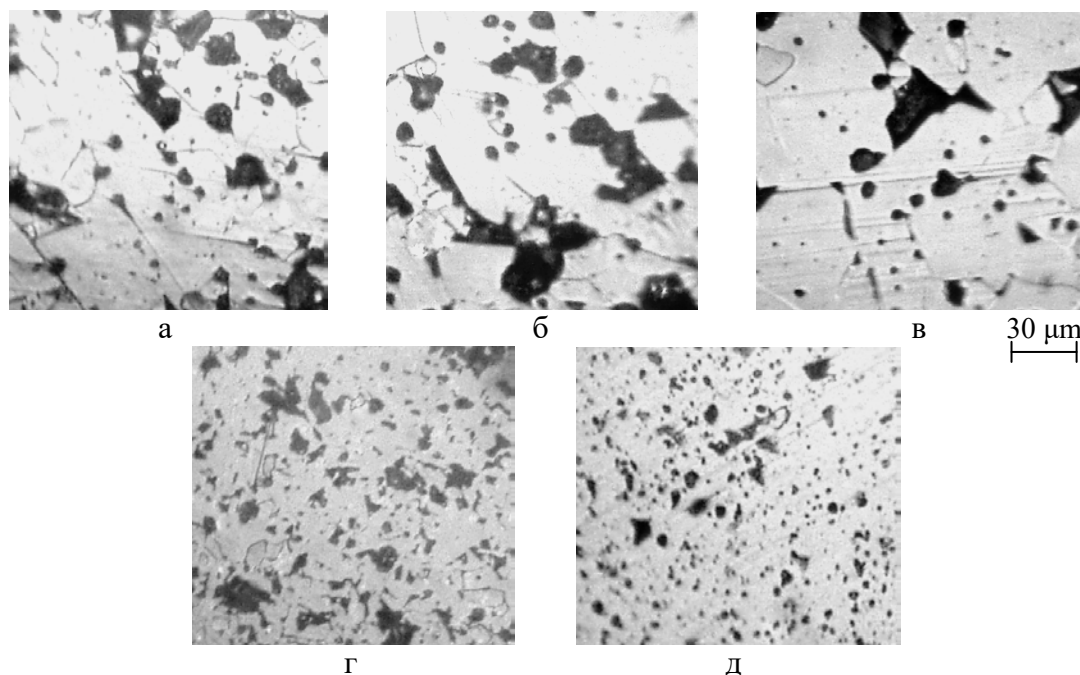
При спекании в воздушной среде увеличение времени выдержки при 1550 °C до 4,0 часов плотность и твердость материалов практически не меняются, механическая прочность незначительно возрастает. Увеличение температуры с 1550 до 1600 °C даже приводит к снижению механической прочности спеченных материалов.

Структура и износостойкость керамических материалов, полученных по оптимальным режимам спекания.

Структуру спеченных материалов изучали на шлифах на оптическом микроскопе NU-2 фирмы Carl Zeiss Jena. Шлифы готовили по следующей методике:

- образцы керамики заливали смолой эпоксидной с отвердителем;
- грубое шлифование проводили на шлифовальном станке 03ШП на алмазном круге зернистостью 40 мкм под струей воды в течение 20 мин;
- тонкое шлифование проводили на шлифовальном станке 03ШП на деревянном круге алмазными пастами АСМ 14/10 и АСМ 7/5 НВМ последовательно в течение 10 мин каждой;
- полирование проводили вручную на деревянном круге техническим глиноземом ГО в течение 10-20 мин;
- доводку поверхности проводили вручную на деревянном круге, покрытом фетром, окисью хрома до получения зеркальной поверхности.

Для выявления границ зерен проводили химическую обработку поверхности шлифов: 30 мин в 10 % растворе NaOH, затем в 18 % растворе HF в течение 0,5-2 часов (до выявления структуры). Фотографии поверхности образцов приведены на рисунке 1.



а – образец № 1: ВК94-1, $T = 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 4,0\text{ ч}$, воздух; б – образец № 2: ВК94-1, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 4,0\text{ ч}$, воздух; в – образец № 3: ВК94-1, $T = 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 3\text{ ч}$, вакуум; г – образец № 8: Охал, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 3\text{ ч}$, воздух; д – образец № 9: Охал, $T = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 4\text{ ч}$, газовая печь

Рисунок 1. – Структура алюмооксидной керамики. $\times 200$

Структура образцов 1-3 керамики ВК94-1, показанная на рисунках 1а-1в, очень похожая – плотная, с малым количеством включений и пор, с четкими границами зерен. Структура относительно крупнокристаллическая: средний размер кристаллов – 20 мкм, средний размер пор – 5 мкм. Большие темные пятна с прямыми гранями на фотографии структуры могут быть интерпретированы, как следы от вырывания зерен при шлифовке. Анализ структуры образцов 1 и 2 показывает, что режим термообработки при $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4 часов является избыточным для керамики ВК – произошел чрезмерный рост кристаллов, практически исчезли мелкие поры. Преобладающий размер пор – 7-10 мкм.

Структура керамики ВК, спеченной в вакууме (образец 3), более однородная, границы зерен практически неразличимы. Преобладающий размер пор 3-5 мкм.

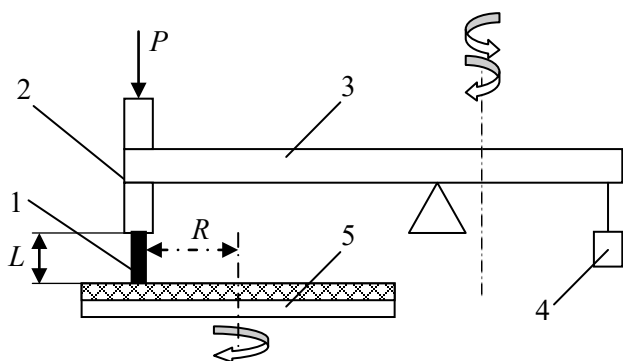
Наиболее плотная, однородная и мелкокристаллическая структура у образца № 9 керамики Oxal, спеченной в газовой печи при температуре 1600 °С. Границы зерен практически неразличимы. Преобладают очень мелкие поры размером 1-2 мкм. Более крупные темные пятна с острыми гранями следует рассматривать, как следы вырывания зерен – по ним можно судить о размерах зерен – максимально до 10 мкм.

Образец № 8 этой керамики, спеченный в воздушной среде электрической печи при этой же температуре, имеет более неоднородную структуру, общая площадь пор

значительно выше. Поры гораздо крупнее – их средний размер 2-5 мкм. Видны границы зерен – их средний размер 5-15 мкм.

Проведена оценка износоустойчивости образцов корундовой керамики. Измерение износостойкости корундовой керамики проводили на установке, показанной на рисунке 2, по методике, описанной в работе [5].

Керамический образец 1 закрепляется механическим способом в зажиме 2, который в свою очередь крепится на балке-«водителе» 3. «Водило» совершает колебательные движения постоянной амплитуды относительно оси вращения. Амплитуда колебаний задается длиной балки. Длина держателя зажима 2 и выступающей части керамического образца подбирается таким образом, чтобы балка в процессе испытаний принимала горизонтальное положение. Постоянство длины рычага обеспечивает определенную величину средней линейной скорости. Величина нагрузки на образец изменяется с помощью противовеса 4 и контролируется динамометром.



1 – образец; 2 – зажим; 3 – балка-плечо;
4 – противовес; 5 – алмазная шайба

Рисунок 2. – Схема установки для определения износа

туда колебаний задается длиной балки. Длина держателя зажима 2 и выступающей части керамического образца подбирается таким образом, чтобы балка в процессе испытаний принимала горизонтальное положение. Постоянство длины рычага обеспечивает определенную величину средней линейной скорости. Величина нагрузки на образец изменяется с помощью противовеса 4 и контролируется динамометром.

Образец в процессе трения контактирует с вращающейся алмазной шайбой 5 определенной зернистости, поверхность которой для обеспечения одинаковых условий «вскрывалась» наждачным камнем перед каждым испытанием.

Методика была реализована на установке, собранной на базе шлифовально-полировального станка 3ШП-350, оснащенного алмазной шайбой 2723-0201 А2 50/40 100 М2-01 ГОСТ 17007-80. Конструкция установки позволяет ступенчато изменять угловую скорость вращения шайбы от 40 до 172 об/мин и предусматривает непрерывную подачу охлаждающей жидкости в зону контакта.

Измерения проводили на 3-х образцах (квадратного сечения 4×4 мм) от каждой партии керамики. Образцы предварительно шлифовали на алмазной шайбе до получения полного контакта поверхности 16 мм². Условия испытаний: нагрузка на образце – 8 Н, линейная скорость шайбы в зоне контакта – 15 м/с, время – 60 с. Образцы и шайба охлаждались водой. Измеряли линейный износ керамики за указанное время. Результаты представлены в таблице.

Установлено, что наименьший износ у образцов 3, 4 (ВК94-1) и 8, 9 (Oxal), причем износ образцов, изготовленных из корундового керамического материала ВК94-1, незначительно (в пределах ошибки измерения), но ниже, чем у образцов из материала Oxal. Этим образцам соответствуют наибольшие значения плотности, механической прочности, твердости. Образцы 5-7 и 10, изготовленные из керамики с большим содержанием Al₂O₃, менее стойки к истиранию.

Выводы:

- наибольшей износостойкостью обладает керамика, полученная из керамического материала ВК94-1, причем разница в износостойкости образцов, полученных в вакууме и в окислительной среде, невелика;
- износостойкость корундовых материалов определяется, в первую очередь, химическим составом керамического материала, точнее – активаторами спекания, входящими в состав керамики;
- пористость и плотность структуры керамики имеют второстепенное значение для ее износостойкости;
- спеканием корундового керамического материала ВК94-1 при температуре 1550 ± 25 °С в течение 3 часов в условиях вакуума получается материал с кажущейся плотностью не менее $3,83 \text{ г/см}^3$ и пористостью ≤ 1 %;
- спеканием корундового керамического материала Охал при температуре 1600 ± 25 °С в течение 3 часов в газовой печи получается материал с кажущейся плотностью не менее $3,85 \text{ г/см}^3$ и пористостью ≤ 1 %.

Список использованных источников

1. Павленко, А.П. Подбор состава технологической связки термопластичных шликеров из порошков неорганических материалов / А.П. Павленко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 62-67.
2. Павленко, А.П. Формование изделий из алюмооксидной керамики / А.П. Павленко, Н.А. Ахраменко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 77-85.
3. Павленко, А.П. Оптимизация процесса удаления технологической связки из изделий на основе керамики / А.П. Павленко, Н.А. Ахраменко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 85-91.
4. Химическая технология керамики и огнеупоров / под общ. ред. П.П. Будникова и Д.Н. Полубояринова. – М.: Стройиздат, 1972. – 552 с.
5. Дынкович, В.Н. Методика ускоренной оценки износостойкости керамических материалов / В.Н. Дынкович, А.П. Павленко // Трение и износ. – 2006. – № 2. – С. 221-224.

Информация об авторах

Павленко Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и энергоэффективные технологии», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: FiET@tut.by.

Ахраменко Николай Арсеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Физика и энергоэффективные технологии», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: FiET@tut.by.

Буй Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика и энергоэффективные технологии», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mixail255@mail.ru.

Information about the authors

Pavlenko Alexander – Ph. D. (Engineering), Associate professor of “Physics and energy-efficient technologies” Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: FiET@tut.by.

Akhramenko Nikolay – Ph. D. (Engineering), Associate professor of “Physics and energy-efficient technologies” Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: FiET@tut.by.

Bui Mikhail – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate professor of “Physics and energy-efficient technologies” Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: mixail255@mail.ru.

Поступила в редакцию 02.02.2021 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 – подрисуночную 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>