

ISSN 1728-3841

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2021 № 3



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021 № 3

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2021

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.
Выходит четыре раза в год

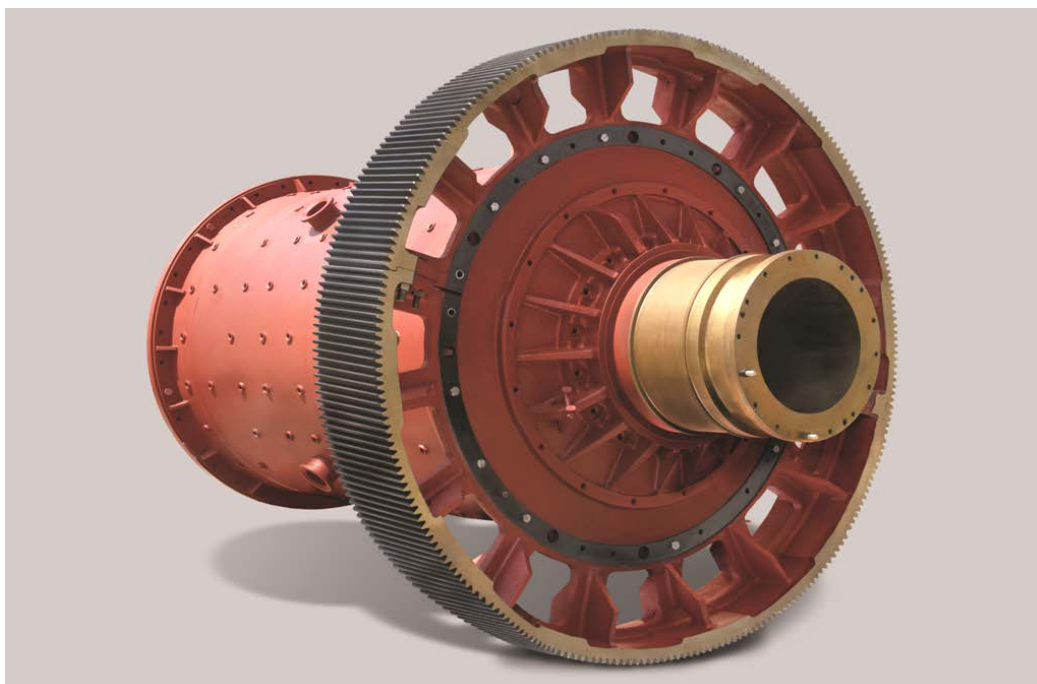
Редакция:

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) 33 01 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

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Березовский Н.И., Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Матвиенко Д.С.** Математическое моделирование процесса термодинамического разрушения мерзлых пород при бурении скважин... 5
- Оника С.Г., Цыбуленко П.В., Астапенко Т.С., Дереповская Е.Р.** Инновационное технологическое обеспечение эффективной разработки карбонатного сырья в условиях карьеров с большой производственной мощностью 11

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Шелег В.К., Довгалев А.М., Тарадейко И.А.** Повышение эффективности процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания 17
- Павлечко В.Н.** Параметры среды в каналах центростремительной турбины при изменении угла наклона лопастей 25
- Бровка Г.П., Шилович Н.Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородного полого цилиндра с неподвижной внешней боковой границей при осесимметричной нагрузке 31
- Гуцев Д.М., Скороход А.З., Моисеенко В.Л.** Разработка технической документации устройства для механизации путевых работ 41
- Вишняк Б.А., Сереброва Т.В.** Автоматизированное управление комплексом процессов фильтрования и сушки концентрата сильвинитовой обогатительной фабрики 49
- Высоцкая Н.А.** Основные физико-химические и структурно-механические свойства гранулированных минеральных удобрений 59
- Тройнич В.А., Грідюшко Д.В., Брижевич А.В.** Модернизация бункера-перегрузателя путем установки на него барового исполнительного органа 66
- Басалай Г.А.** Динамическая модель одномоторного привода соосных роторов проходческого комбайна 75

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Поддубный А.А., Петрусевиц В.В., Кацубо П.А.** Оценка изменения гидрофобности поверхности дорожно-строительных материалов посредством определения краевого угла смачивания 80
- Инютин В.И., Кожедуб С.С., Краснов М.А., Шаповалов В.М.** Исследование влияния модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства композиционного материала 85
- Лашкина Е.В.** Инсектицидная полимерная пленка, модифицированная функциональными наполнителями 92
- Подобед Д.Л.** Влияние функциональных добавок на специальные свойства термопластов 99

ЛЮДИ НАУКИ

- Войтов Игорь Витальевич** (к 60-летию со дня рождения) 106
- Марукович Евгений Игнатьевич** (к 75-летию со дня рождения) 107

На обложке: перегружатель ленточный телескопический ПЛТ-1660.

На 1-й стр.: мельница стержневая для мокрого измельчения различных руд и других материалов – товар года 2020.

На 3-й стр.: пресс валковый для производства гранулированных удобрений – товар года 2019.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

Подписаться на журнал можно в почтовых отделениях связи «Белпочта» или

по «Интернет-подписке» РУП «Белпочта» на сайте: <https://www.belpost.by/onlineSubscription/items>

Подписные индексы печатной версии журнала: 74933, 749332; электронной версии: 30006, 300062.

Ответственный секретарь А.В. Протасеня.

Подписано в печать 31.08.2021 г. Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м².

Заказ 2655. Усл. печ. л. 12,47. Тираж 100 экз.

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

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 3 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), E.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) 33 01 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

GEOTECHNOLOGY

Berezovsky N.I., Voronova N.P., Kostyukevich E.K., Matvienko D.S. Mathematical modeling of the thermodynamic destruction process of frozen rocks during well drilling	5
Onika S.G., Tsybulenko P.V., Astapenko T.S., Derepovskaya E.R. Innovative technological support of the effective development of carbonate raw material in open pits with large production capacity	11

MACHINE-BUILDING

Sheleg V.K., Dovgalev A.M., Taradeiko I.A. Increasing the efficiency of the magnetic dynamic rolling process	17
Pavlechko V.N. Parameters of the medium in the inward-flow turbine channels when changing the inclination angle of the blades	25
Brovka G.P., Shilovich N.N. Simulation of the stress-strain state of inhomogeneous quill cylinder with a fixed external lateral boundary under axisymmetric load	31
Gutsev D.M., Skorohod A.Z., Moiseenko V.L. Development of technical documentation of the device for trackwork mechanization	41
Vishnyak B.A., Serebrova T.V. Automated control of the complex of processes of concentrate filtering and drying of the silvinit concentration plant	49
Vysotskaya N.A. Basic physico-chemical and structural-mechanical properties of granulated mineral fertilizers	59
Troinich V.A., Hrydziushka D.V., Bryzhevich A.V. Modernization of a hopper for pumping ore by installing a device for cutting slits on it	66
Basalai R.A. Single-motor drive dynamic model of coaxial rotors of road heading machine	75

MATERIALS ENGINEERING

Poddubny A.A., Petrusevich V.V., Katsubo P.A. Change assessment in hydrophobicity of the surface of road materials by means of determination the limiting wetting angle	80
Iniutin V.I., Kozhedub S.S., Krasnov M.A., Shapovalov V.M. Modifying additive impact study on composite material service characteristics	85
Lashkina E.V. Insecticidal polymer film modified with functional fillers	92
Podobed D.L. The effect of functional additives on special properties of thermoplastic materials	99

PEOPLE OF SCIENCE

Voitov Igor Vitalievich (for the 60 th anniversary)	106
Marukovich Evgeny Ignatievich (for the 75 th anniversary)	107

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.83(075.8)

Н.И. Березовский¹, Н.П. Воронова¹, Е.К. Костюкевич¹, Д.С. Матвиенко²¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь²УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого»,
г. Гомель, Беларусь**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕРЗЛЫХ ПОРОД
ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН**

Аннотация. Повышение производительности оборудования при бурении скважин мерзлых рыхлых и связных пород является насущной проблемой в связи с налипанием и намерзанием породы на рабочую поверхность. Это проблема просматривается во многих отраслях промышленности: в горном деле, промышленном, гражданском, энергетическом, дорожном строительстве. Предлагается исследование проблемы с использованием аналитических методов и применения формул для реальных инженерных расчетов.

Ключевые слова: буровые работы, термодинамическое разрушение, математическая модель, плавление и абляция, очистка оборудования.

N.I. Berezovsky¹, N.P. Voronova¹, E.K. Kostyukevich¹, D.S. Matvienko²¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²Sukhoi State Technical University of Gomel, Belarus**MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMODYNAMIC DESTRUCTION
PROCESS OF FROZEN ROCKS DURING WELL DRILLING**

Abstract. Increasing productivity of equipment during well drilling of frozen, friable and cohesive rocks is an actual problem in connection with the sticking and freezing of rock on the working surface. This problem exists in many industries: mining, industrial, civil, energy, road construction. The study of the problem using analytical methods and application of formulas for real engineering calculations is proposed.

Keywords: drilling operations, thermodynamic destruction, mathematical model, melting and ablation, cleaning of equipment.

Введение. В горном деле, промышленном, гражданском, энергетическом строительстве есть необходимость в выполнении большого объема буровых работ. Чаще всего эти работы связаны с такими породами, как песок, супеси, глины с галечными и валунными включениями. Использование традиционных механических буровых машин в условиях мерзлых пород без применения термического и термомеханического способов воздействия практически невозможно.

При бурении мерзлых рыхлых и связных пород возникает проблема налипания на рабочую поверхность оборудования, что приводит к резкому снижению производительности. Борьба с налипанием и намерзанием может осуществляться с помощью нанесения профилактических гидрофобных веществ, пленочных покрытий, смачивания рабочих поверхностей растворами хлористых солей. Недостатками приведенных спо-

собов являются кратковременность профилактического действия и низкая производительность.

Широкое применение нашло термодинамическое разрушение мерзлых рыхлых и связных пород с использованием оттаивания и абляции. Метод применяется при необходимых значениях термодинамических параметров теплоносителя.

Основная часть. Известно [1], что температура поверхности T при граничных условиях третьего рода для полупространства имеет вид:

$$\frac{T_{\pi} - T_0}{T} = 1 - e^{\frac{\alpha^2 a}{\lambda^2} t} \cdot \Phi\left(\frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{at}\right), \quad (1)$$

где T_{π} – температура поверхности мерзлой породы в момент разрушения, К;

T_0 – начальная отрицательная температура мерзлой породы, равная температуре воздуха, К;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

a – коэффициент температуропроводности мерзлой породы, м²/с;

λ – коэффициент теплопроводности мерзлой породы, Вт/(м·К);

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x^2} dx;$$

t – время нагрева, с.

Величины $x = \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{at}$ и $x^2 = \frac{\alpha^2 a}{\lambda^2} t$ весьма малы, поэтому можно пренебречь

малыми высших порядков в разложении функции $\Phi(x)$ и e^{x^2} в ряд, в результате из

формулы (1) получим $T = \frac{\lambda}{2\alpha} (T_{\pi} - T_0) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{at}}$.

Критерий оценки терморазрушаемости имеет вид [2]:

$$T - T_0 = \frac{2\sigma(1-\mu)}{\beta E}, \quad (2)$$

где σ – предел прочности породы на сжатие, Па;

μ – коэффициент Пуассона;

β – коэффициент линейного теплового расширения породы, 1/К;

E – модуль упругости породы, Па.

Произведем оценку терморазрушаемости для чистого льда при характеристиках в формуле (2): $\sigma = 2 \cdot 10^6$ Па; $\mu = 0,35$; $\beta = 5,5 \cdot 10^{-5}$ 1/К; $E = 10^{10}$ Па [3].

В результате получим для льда $T - T_0 = 4$ °С. Принимая в формуле (1) $a = 10^{-6}$ м²/с; $t = 10^{-5}$ с для льда и мерзлых пород, имеем: при $\frac{\alpha}{\lambda} T \leq 10^6$ °С/м разрушение мерзлых

пород при $T \leq -4$ °С осуществляется в режиме плавления. Такой режим термодинамического разрушения мерзлых рыхлых и связных пород устойчив, когда скорость истечения теплоносителя достаточна для создания динамического давления, необходимого при отрыве оттаявших с поверхности частиц горной массы и их удаления.

Для использования аналитического описания процесса термодинамического разрушения пород путем оттаивания и абляции применяется представление их твердыми частицами, равномерно распределенными в объеме льда. В этом исследовании важную роль играет скорость плавления льда с абляцией. Для ее определения применим математическую модель, соответствующую одномерной задаче плавления полуограниченного стержня с теплоизолированной боковой поверхностью при известной начальной

температуре мерзлых рыхлых и связных пород T_0 . В начальный момент $t = 0$ на поверхность начинает действовать газовый теплоноситель с температурой T_r . Примем, что теплообмен осуществляется по закону конвекции, в начальный момент плавления $t_{пл}$ температура поверхности равна температуре фазового перехода лед-вода $T_{пер}$. Температуру поверхности можно считать постоянной, равной $T_{пер}$, т.к. расплав будет постоянно удаляться.

В данной постановке задачи весь процесс можно разбить на два этапа: нагрев поверхности от T_0 до $T_{пер}$ без абляции и нагрев с плавлением и абляцией.

Для нахождения времени плавления необходимо решить следующую краевую задачу для уравнения теплопроводности при начальном и граничных условиях вида [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (3)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha [T_r - T(0, t)]; \quad (5)$$

$$T(\infty, t) = T_0, \quad (6)$$

где x – координата расположения полуограниченного пространства, $x \geq 0$.

Если перейти к безразмерным параметрам:

- текущая температура $u(y, \tau) = \frac{T - T_{пер}}{T_{пер} - T_0};$

- температура теплоносителя $U_r = \frac{T_r - T_{пер}}{T_{пер} - T_0};$

- безразмерная координата $y = x\alpha / \lambda;$

- текущее время: $\tau = \frac{t\alpha^2}{\lambda^2};$

- безразмерная координата, до которой наблюдается влияние температуры поверхности при нагреве, соответствующая аналогичной размерной координате x_z

$$z = x_z \alpha / \lambda.$$

Величину z можно найти из уравнения:

$$\ln \left(1 + \frac{z}{3} \right) = -\frac{z^2}{18} - \frac{z}{3} + \frac{4}{3} \tau. \quad (7)$$

Решение краевой задачи (3)-(6) с использованием операционного метода в безразмерных параметрах имеет вид:

$$u(y, \tau) = \frac{1 + U_r}{z^3 + 3z^2} (z - y)^3 - 1. \quad (8)$$

Учитывая, что в начальный момент плавления температура на поверхности равна $T_{пер}$, следовательно, $u(0, \tau_{пл}) = 0$, где $\tau_{пл} = t_{пл} \cdot \alpha^2 / \lambda^2$ – безразмерное время плавления.

Из (8) получим:

$$\frac{(1 + U_r) z_{пл}^3}{z_{пл}^3 + 3z_{пл}^2} - 1 = 0, \quad (9)$$

где $z_{\text{пл}}$ – предельная безразмерная координата, учитывающая влияние нагрева поверхности до температуры $T_{\text{пер}}$:

$$z_{\text{пл}} = \frac{3}{U_{\text{r}}} . \quad (10)$$

Оценим безразмерное время начала плавления поверхности полупространства, подставляя $z_{\text{пл}}$ из формулы (10) в формулу (7):

$$\tau_{\text{пл}} = \frac{3}{4} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{U_{\text{r}}} \right) + \frac{1}{2U_{\text{r}}^2} + \frac{1}{U_{\text{r}}} \right] .$$

Тогда время начала плавления с удалением продуктов плавления будет равно:

$$t_{\text{пл}} = \frac{\frac{3}{4} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{U_{\text{r}}} \right) + \frac{1}{2U_{\text{r}}^2} + \frac{1}{U_{\text{r}}} \right] \cdot \lambda^2}{\alpha^2 \cdot a} . \quad (11)$$

С момента $t_{\text{пл}}$, найденного по формуле (11), начинается процесс плавления с абляцией, который может быть описан с помощью математической модели [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} ; \quad (12)$$

$$T(z_{\text{пл}}, t) = T_{\text{пер}} ; \quad (13)$$

$$T(\infty, t) = T_0 ; \quad (14)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_{\text{пл}}} = \alpha (T_{\text{r}} - T_{\text{пер}}) - L_{\text{ф}} \rho \frac{\partial z_{\text{пл}}}{\partial t} , \quad (15)$$

где $z_{\text{пл}} = z(t)$ – координата фронта плавления, м;

$L_{\text{ф}}$ – теплота плавления льда, Дж/кг;

ρ – плотность материала, кг/м³.

Вводя безразмерные величины $z = \frac{\alpha z_{\text{пл}}}{\lambda}$ и $K = \frac{L_{\text{ф}} \rho a}{(T_{\text{пер}} - T_0) \lambda}$, дополнительно к

уже введенным ранее, краевая задача (12)-(15) примет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} ; \quad (16)$$

$$U(Z, \tau) = 0 ; \quad (17)$$

$$U(\infty, \tau) = -1 ; \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=Z} = K \frac{\partial Z}{\partial \tau} - U_{\text{r}} . \quad (19)$$

Если применить преобразование Лапласа к краевой задаче (16)-(19) аналогично решению задачи (12)-(15), получим:

$$u(y, \tau) = \frac{(y - z)^3}{(Z - z)^3} - 1 . \quad (20)$$

На основании граничного условия (19) имеем:

$$\frac{3(y-z)^3}{(Z-z)^3} \Big|_{y=Z} = K \frac{\partial Z}{\partial \tau} - U_r,$$

тогда

$$\frac{3}{Z-z} = K \frac{\partial Z}{\partial \tau} - U_r. \quad (21)$$

Проинтегрируем (16) по промежутку $y \in [Z, z]$ и, подставляя $u(y, \tau)$ из формулы (20), имеем:

$$\begin{aligned} \left[\frac{3(y-z)^4}{4(Z-z)^4} \left(\frac{\partial Z}{\partial \tau} - \frac{\partial z}{\partial \tau} \right) - \frac{(y-z)^3}{(Z-z)^3} \frac{\partial z}{\partial \tau} \right] \Big|_Z^z &= \frac{3(y-z)^2}{(Z-z)^3} \Big|_Z^z; \\ -\frac{3}{4} \left(\frac{\partial Z}{\partial \tau} - \frac{\partial z}{\partial \tau} \right) - \frac{\partial z}{\partial \tau} &= K \frac{\partial Z}{\partial \tau} - U_r. \end{aligned} \quad (22)$$

Решая систему из уравнений (21) и (22) при условии $z(\tau_{пл}) = z_{пл}$, $Z(\tau_{пл}) = 0$, получаем трансцендентное уравнение относительно безразмерной координаты фронта плавления Z , дифференцируя его по τ и выражая безразмерную скорость продвижения фронта плавления, получим:

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = \frac{4U_r^2 [U_r(\tau - \tau_{пл}) - (K+1)Z]}{3K [3 + 4U_r^2(\tau - \tau_{пл}) - 4U_r(K+1)Z]}. \quad (23)$$

Оценив величину $\partial Z / \partial \tau$ из формулы (23), можно с достаточной точностью при $K \gg 1$ пользоваться в практических расчетах выражением:

$$\vartheta_{пл} = \frac{\partial Z}{\partial \tau} = \frac{U_r}{K}, \quad (24)$$

где $\vartheta_{пл}$ – скорость плавления.

Для реальных мерзлых пород известны [6] характеристики:

$$L_\phi = 3,32 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}; \quad \rho \approx 2,6 \text{ кг/м}^3; \quad \lambda \approx 2,3 \text{ Вт/(м·К)}; \quad a \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad T_{пер} - T_0 \approx 15 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Величина K в этом случае значительно больше единицы ($\approx 2 \cdot 10^2$), следовательно, формулой (24) можно пользоваться для инженерных расчетов. Переходя к размерным величинам, скорость разрушения мерзлых пород определяется по следующей формуле:

$$\vartheta = \frac{dZ}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \frac{dZ}{d\tau} \cdot \frac{d}{dt} \left(t \cdot \frac{a\alpha^2}{\lambda^2} \right) = \frac{a\alpha^2}{\lambda^2} \cdot \frac{dZ}{d\tau} = \frac{a\alpha^2}{\lambda^2} \cdot \frac{d}{d\tau} \left(\frac{Z\lambda}{\alpha} \right) = \frac{a\alpha}{\lambda} \cdot \frac{dZ}{d\tau} = \frac{a\alpha}{\lambda} \vartheta_{пл}. \quad (25)$$

Выводы. Таким образом, формула (25) позволяет прогнозировать результаты процесса термодинамического разрушения мерзлых пород при бурении скважин. Также формула (25) позволяет определить скорость разрушения мерзлых пород на период очистки добычного оборудования до момента достижения поверхности оборудования. Далее проходит процесс, связанный со сколом мерзлой горной породы с рабочей поверхности, и этот процесс уже описывается с помощью другого исследования с учетом попадания газового потока в пространство кольцевого клина.

Список использованных источников

1. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б.М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А.П. Несенчука. – Минск: БНТУ, 2007-2009. – Ч. 1. – 2007. – 606 с.
2. Воронова, Н.П. Математическое моделирование и управления теплотехнологиями промышленных производств: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
3. Разработка термогидроаэродинамических основ создания стыковых сопряжений при строительстве и реконструкции жилых и общественных зданий: отчет о НИР (заключ.) 06-59 / Белорусский национальный технический университет; рук. Б.М. Хрусталева, отв. исполн. В.Д. Сизов [и др.]. – Минск, 2010. – 130 с. – № ГР 2006518.
4. Воронова, Н.П. Математическое моделирование энергосберегающих технологий нагрева, сушки и термообработки: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.
5. Гончаров, С.А. Термодинамические процессы: учеб. для вузов / С.А. Гончаров, К.И. Наумов. – М.: Горная книга, 2009. – 397 с.
6. Лыков, А.В. Теплообмен / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

Информация об авторах

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

Наталья Петровна Воронова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Математические методы в строительстве», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: bntu@bntu.by.

Елена Казимировна Костюкевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: khelenek@tut.by.

Денис Сергеевич Матвиенко – старший преподаватель кафедры «Нефтегазозаработка и гидропневмоавтоматика», УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого» (Пр. Октября, 48, 246029, г. Гомель, Беларусь), e-mail: denmatv@gmail.com.

Information about the authors

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

Natalia Petrovna Voronova – Ph. D. in engineering, Professor of the “Mathematical methods in construction” Department, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), e-mail: bntu@bntu.by.

Elena Kazimirovna Kostyukevich – Ph. D. in engineering, Associate Professor of the “Mining machinery” Department, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., Minsk, 220013, Belarus), e-mail: khelenek@tut.by.

Denis Sergeevich Matvienko – Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Development and Hydropneumatic Automatics, Sukhoi State Technical University of Gomel (48, October Ave., 246029, Gomel, Belarus), e-mail: denmatv@gmail.com.

Поступила в редакцию 11.06.2021 г.

УДК 622.363.6.012.3-027.236(476)(045)

С.Г. Оника, П.В. Цыбуленко, Т.С. Астапенко, Е.Р. Дереповская*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***ИННОВАЦИОННОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОЙ РАЗРАБОТКИ КАРБОНАТНОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ
КАРЬЕРОВ С БОЛЬШОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МОЩНОСТЬЮ**

Аннотация. В статье рассмотрены инновационные технологические схемы разработки высоких уступов применительно к месторождениям цементного сырья, основанные на применении подступов, имеющих общий транспортный горизонт, а также обоснована эффективность технологии бестранспортной вскрыши.

Ключевые слова: карьер, экскаватор, уступ, месторождения, вскрыша, мел, доломит, технология, транспорт, инновация.

S.G. Onika, P.V. Tsybulenko, T.S. Astapenko, E.R. Derepovskaya*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***INNOVATIVE TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE EFFECTIVE
DEVELOPMENT OF CARBONATE RAW MATERIAL IN OPEN PITS
WITH LARGE PRODUCTION CAPACITY**

Abstract. The article describes innovative technological schemes of the development of high ledges in relation to the deposits of cement raw materials based on the use of subbenches that have common pit haulage ramp, and also explains technology effectiveness of the transportless overburden.

Keywords: open pit, excavator, ledge, deposits, overburden, chalk, dolomite, technology, transport, innovation.

Введение. Среди горных предприятий нерудной отрасли большое значение для развития экономики имеют карьеры по разработке карбонатного сырья. В Беларуси к ним можно отнести предприятия, эксплуатирующие месторождение мела и мергеля пластового типа Коммунарское (карьеры «Высокое», «Коммунары Западные»), а также группа карьеров, разрабатывающих месторождения «Колядичи», «Колядичи-2», представленные линзами мела. Наибольшую производственную мощность имеет карьер «Гралево», разрабатывающий одноименный участок месторождения доломитов «Руба».

Большая производительность карьеров предопределила применение мощного карьерного оборудования, в числе которого шагающие экскаваторы, автомобильный транспорт, а также железнодорожный транспорт с высокой грузоподъемностью. Необходимость в применении горнотранспортного оборудования большой производительности продиктована, с одной стороны, геологическими условиями залегания полезного ископаемого, с другой – потребностями перерабатывающих заводов в сырье.

Использование высокопроизводительной техники предъявляет повышенные требования к эффективному ее использованию на базе современных инновационных технологий. Повышение эффективности разработки мощных залежей неразрывно связано с увеличением высоты уступов, что подтверждается практикой разработки месторождений полезных ископаемых и результатами исследований [1-3]. При применении прямых лопат, в том числе с удлиненным рабочим оборудованием, в мягких и плотных

породах, не требующих предварительной подготовки к выемке взрывом, высота уступа не должна превышать максимальную высоту черпания экскаватора. Аналогичное ограничение, только по глубине черпания, существует и для драглайнов. В общем случае, максимальная глубина черпания драглайна H , устанавливающая высоту уступа, определяется рядом основных факторов [4]:

$$H = (R_q - b/2 - l_n) \operatorname{tg} \gamma, \quad (1)$$

где R_q – максимальный радиус черпания драглайна, м;

b – длина хода драглайна, м;

l_n – шаг передвижки экскаватора, м;

γ – угол устойчивого откоса уступа, град.

Исследования показали, что угол устойчивого откоса, оказывающий влияние на максимальную глубину черпания при прочих равных условиях, зависит также от категории трещиноватости [2]. Таким образом, сдерживающими факторами применения технологии разработки высокими уступами являются ограничение высоты уступа рабочими параметрами выемочно-погрузочного оборудования и свойства пород.

В проекте по расширению карьера «Гралево» нами предусмотрена отработка мощного пласта вскрыши по транспортной технологической схеме двумя подступами с размещением транспортного горизонта на нижней площадке нижнего подступа [3].

При работе по этой схеме прямая лопата или драглайн производит перемещение породы с верхнего подступа на транспортный горизонт, расположенный на нижней площадке нижнего подступа, являющейся кровлей пласта полезного ископаемого. Применение указанной схемы позволяет отрабатывать уступы высотой до 25-38 метров в зависимости от применяемой модели экскаватора, упростить вскрытие месторождения вследствие сокращения числа рабочих горизонтов, сократить ширину рабочих площадок на рабочем борту карьера и, как следствие, увеличить угол откоса рабочего борта.

В качестве других вариантов технологических схем ранее исследовано использование при отработке верхнего вскрышного уступа прямой лопаты с удлиненным рабочим оборудованием, которая сбрасывает вскрышную породу верхнего подступа на нижнюю площадку нижнего подступа. Также предложена бестранспортная схема вскрыши, отличительной особенностью которой является размещение драглайна на кровле нижнего вскрышного подступа, при непосредственном перемещении вскрыши в выработанное пространство [3].

Применение указанных технологий в совокупности позволяет повысить экономическую эффективность за счет уменьшения затрат на горно-капитальные работы, снизить затраты на вскрышные работы за счет переноса их объемов на более поздние периоды. Вместе с тем, большое разнообразие природных условий залегания месторождений и взаимосвязанные с ними решения механизации отработки месторождений, представленных мощными пластами вскрыши и полезной толщи, диктуют необходимость дальнейшего развития и внедрения инновационных технологических решений разработки карбонатных месторождений.

Основная часть. В условиях ограничения высоты уступа рабочими параметрами оборудования и свойствами пород для отработки мощных пластов вскрыши и полезного ископаемого необходимы инновационные решения увеличения высоты уступов, которые позволяют повысить эффективность разработки месторождений.

При разработке участков мергеля «Высокое» и «Коммунары Западные» месторождения Коммунарское суммарная мощность полезной толщи, представленная «низкими» и «высокими» мергелями, достигает 30-37 метров. Раздельная их разработка са-

мостовыми уступами требует вскрытия рабочих горизонтов уступов отдельными траншеями или групповой траншеей с последующим разносом нерабочих бортов за счет размещения на них транспортных берм, а также обустройства временных автомобильных дорог или железной дороги на каждом рабочем горизонте.

Технологическое решение по перемещению пород верхнего подступа на нижнюю площадку нижнего подступа здесь не рационально, так как получение транспортного доступа на подошву карьера затруднено. Сущность инновационной технологии состоит в использовании транспортного горизонта единого для всей полезной толщи, но в отличие от рассмотренных нами ранее решений, рабочая площадка занимает промежуточное положение между верхним и нижним подступами (рисунок 1). Данная схема, как показывает опыт ее применения, эффективна при разработке мощных пластов полезного ископаемого.

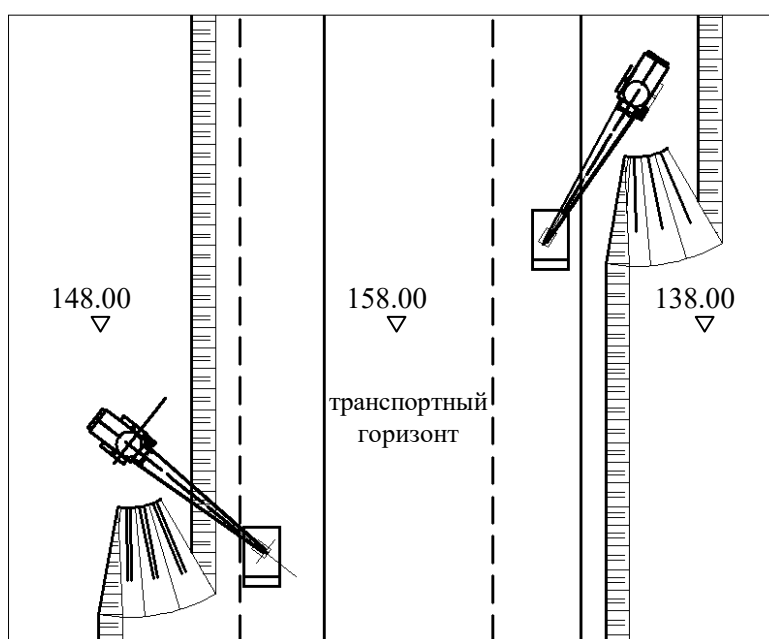


Рисунок 1. – Технологическая схема отработки мощной полезной толщи

Технология реализована на карьере «Высокое» и «Коммунары Западные». Особенности технологии является нижнее черпание шагающими драглайнами на верхнем и нижнем подступах. При этом экскаватор, отрабатывающий верхний подступ, осуществляет разгрузку в средства транспорта, располагаемые на уровне его стояния, а экскаватор, отрабатывающий верхний подступ, осуществляет нижнюю разгрузку на единый транспортный горизонт. На транспортном горизонте устраивается два пути или две автомобильные дороги. Расстояние между осями смежных путей транспортного горизонта принимается равным ширине экскаваторной заходки. Такая система позволяет использовать каждый путь или автомобильную дорогу дважды: сначала для отработки экскаватором верхнего подступа, а затем – экскаватором, ведущим разработку нижнего подступа.

Кроме того, для своевременного введения в работу железнодорожных путей на откаточном горизонте на карьере «Высокое» предложена инновационная технология подготовки горизонта для прокладки вновь вводимого железнодорожного пути. Для этого на транспортном горизонте на верхнем подступе проводится опережающая разрезная траншея на всю длину фронта параллельно отрабатываемой заходке. В эту

траншею укладывается третий железнодорожный путь, чем обеспечивается непрерывный процесс подготовки железнодорожных путей и отработки экскаваторных заходов на верхнем и нижнем подступе.

Для сокращения площади земельного отвода в карьерах рационально применение внутреннего отвалообразования вскрыши. Его преимущество не ограничивается сокращением изымаемых из хозяйственного оборота земельных участков. Внутреннее отвалообразование пустых пород при транспортных технологических схемах уменьшает расстояние транспортирования, а при бестранспортной схеме с поперечным перемещением непосредственно в выработанное пространство – резко уменьшает расходы в карьере на транспорт в целом.

Вместе с тем, при внутреннем отвалообразовании достигается еще один в меньшей степени заметный эффект при разработке обводненных месторождений. В карьерах, в которых приток воды формируется преимущественно подземными водами, его величина существенно зависит от площади поверхности, через которую вода проникает в выработанное пространство.

Зависимость суточного водопритока прямо пропорциональна длине береговой линии [3]. Развитие внутренних отвалов в выработанной части карьера уменьшает длину береговой линии водоема в отработанной части карьера, уменьшая тем самым площадь всачивания подземных вод в него и нагрузку на насосную станцию по поддержанию проектного уровня воды в карьере.

Дальнейшее развитие идеи внутреннего отвалообразования разработано нами для условий карьера «Гралево» (рисунок 2).

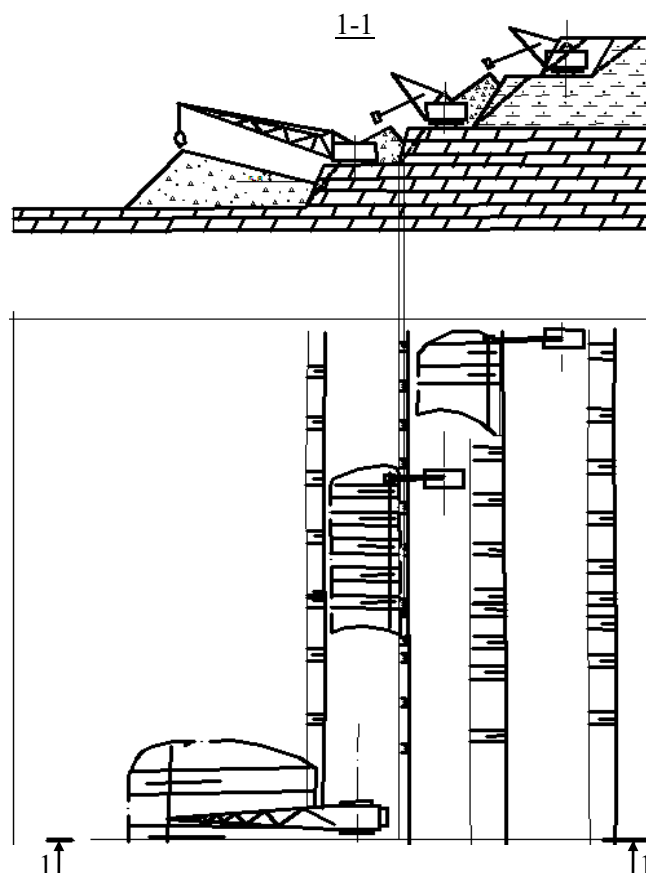


Рисунок 2. – Бестранспортная схема внутреннего отвалообразования

В отличие от ранее представленной схемы мощный экскаватор драглайн максимально приближен к выработанному пространству и размещен на кровле доломитов. При этом, благодаря тяжелому ковшу, он осуществляет верхнее черпание вскрышной породы, перемещенной на кровлю доломитов, либо может верхним черпанием отрабатывать нижний вскрышной подступ. Для предотвращения его скольжения по забою угол откоса забоя драглайна не должен превышать 25 градусов.

Ширина заходки экскаватора, отрабатывающего верхний подступ с поперечным перемещением породы на рабочую площадку нижнего подступа перевалкой без применения транспорта, должна определяться не только исходя из максимального радиуса черпания и углов поворота экскаватора в обе стороны от продольной оси его движения, но и с учетом скоростей перемещения экскаваторных забоев. Установлено, что важнейшим условием соразмерного развития горных работ на смежных подступах является достижение скорости перемещения забоя верхнего подступа не менее скорости или ей равной для нижнего подступа.

При заданном сменном объеме работ по подступу регулирование скорости перемещения забоя достигается изменением ширины экскаваторной заходки:

$$A = \frac{V}{hl_{\text{заб}}}, \text{ м}, \quad (2)$$

где V – среднесменный объем, перемещаемый с верхнего уступа на рабочую площадку, м^3 ;

h – высота верхнего подступа, м;

$l_{\text{заб}}$ – скорость перемещения забоя нижнего подступа, м.

Разработанные технологии в сложных условиях эксплуатации карьеров с большой производственной мощностью позволяют существенно повысить эффективность вскрышных и добычных работ.

Заключение. Обработка мощных залежей вскрыши и полезного ископаемого эффективна при применении инновационных технологий, предусматривающих деление разрабатываемой тощи на подступы и формирование единого для уступа транспортного горизонта, что позволяет увеличить высоту отрабатываемых уступов в два раза в сравнении с технологией обработки с индивидуальным для каждого уступа транспортным горизонтом.

Реализация технологии возможна при автомобильном и железнодорожном транспорте, а также при бестранспортных способах с продольным перемещением вскрыши непосредственно во внутренние отвалы.

Список использованных источников

1. Баулин, А.В. Обоснование параметров технологии обработки вскрышных пород высокими уступами при транспортной системе разработки на угольных разрезах: автореф. дис ... канд. техн. наук: 25.00.22 / А.В. Баулин; Институт горного дела им. А.А. Скочинского. – М., 2002. – 23 с.

2. Геомеханическое обоснование увеличения допустимых углов откосов рабочих уступов на месторождении цементного сырья «Коммунарское» / С.Г. Оника [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 5-12.

3. Оника, С.Г. Варианты технологии вскрышных работ при расширении карьера «Гралево» и их оценка / С.Г. Оника, Ф.Г. Халявкин, Д.И. Бабак // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 5-11.

4. Оника, С.Г. Технология и параметры системы разработки месторождений с использованием драглайнов / С.Г. Оника, С.Н. Березовский // Горная механика. – 2005. – № 2. – С. 13-18.

Информация об авторах

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

Петр Васильевич Цыбуленко – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Горные работы» факультета Горного дела и инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Татьяна Сергеевна Астапенко – старший преподаватель кафедры «Горные работы», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Евгения Руслановна Дереповская – студентка факультета горного дела и инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Information about the authors

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

Pyotr Vasilyevich Tsybulenko – Ph. D. in Engineering sciences, Associate Professor, Professor of the “Mining operations” Department of the Faculty of Mining and Environmental Engineering, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Tatyana Sergeevna Astapenko – Senior Lecturer of the “Mining operations” Department, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Evgeniya Ruslanovna Derepovskaya – student of the Faculty of Mining and Environmental Engineering, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kafedra_gr@mail.ru.

Поступила в редакцию 18.05.2021 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.787.4:621.789(045)(476)

В.К. Шелег¹, А.М. Довгалеv², И.А. Тарадейко²¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь²Белорусско-Российский университет, г. Могилев, БеларусьПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА
СОВМЕЩЕННОГО МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследований шероховатости упрочненных поверхностей от диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов комбинированного инструмента. Определены оптимальные значения диаметра деформирующих шаров инструмента для обработки методом совмещенного магнитно-динамического накатывания стальных заготовок различной твердости. Установлено, что наибольшая деформация исходных микронеровностей ферромагнитных заготовок осуществляется за первый рабочий ход комбинированного инструмента. Представлены сведения о новом методе совмещенного магнитно-динамического накатывания, позволяющем совместить предварительную и окончательную (финишную) упрочняющие обработки и обеспечить за один рабочий ход инструмента эффективное снижение шероховатости поверхности ферромагнитных заготовок.

Ключевые слова: накатывание, деформирующий шар, магнитное поле, шероховатость, комбинированный инструмент, магнитная система, совмещенная упрочняющая обработка, ферромагнитная заготовка.

V.K. Sheleg¹, A.M. Dovgalev², I.A. Taradeiko²¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus²Belarusian-Russian University, Mogilev, BelarusINCREASING THE EFFICIENCY
OF THE MAGNETIC DYNAMIC ROLLING PROCESS

Abstract. The article presents the results of studies of the roughness of hardened surfaces on the diameter of the deforming balls of the tool, the initial roughness of the workpiece surface and the number of working strokes of the combined tool. The optimal values of the diameter of the deforming balls of the tool for the processing of the magnetic dynamic rolling process of steel billets of various hardness have been determined. It has been established that the greatest deformation of the initial microroughness of ferromagnetic workpieces occurs during the first working stroke of the combined tool. The information on the new the magnetic dynamic rolling process is presented, which makes it possible to combine preliminary and final (finishing) hardening treatments and to ensure effective reduction of the surface roughness of ferromagnetic workpieces in one working stroke of the tool.

Keywords: rolling, deforming ball, magnetic field, roughness, combination tool, magnetic system, combined hardening treatment, ferromagnetic workpiece.

Введение. Повышение ресурса работы оборудования, используемого в горнодобывающей отрасли, является важнейшей технологической задачей [1].

Для ее решения повышают долговечность ответственных деталей оборудования, применяя методы поверхностного пластического деформирования [2].

Перспективным является разработанный в последние годы метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН), обеспечивающий комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой ферромагнитных деталей. Согласно методу СМДН на поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [3-6]. СМДН позволяет формировать требуемый микрорельеф поверхности и обеспечивать получение на ферромагнитной детали антифрикционного наноструктурированного поверхностного слоя, обладающего высокими эксплуатационными свойствами [7].

Однако в настоящее время отсутствуют исследования зависимости шероховатости упрочняемой поверхности от диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов инструмента. Это не позволяет устанавливать рациональные параметры инструмента и режимы процесса СМДН, осуществлять прогнозирование шероховатости обработанной поверхности, что сдерживает внедрение метода в производство.

Постановка задачи. Учитывая новизну разработанного метода СМДН, важно оценить влияние диаметра деформирующих шаров инструмента, исходной шероховатости поверхности заготовок и числа рабочих ходов инструмента на шероховатость обработанной поверхности, во многом определяющей ее качественные и эксплуатационные свойства. Полученные результаты исследований будут являться базой для разработки новых эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки, позволят специалистам назначать рациональные режимы процесса СМДН и будут способствовать внедрению метода на предприятиях машиностроения.

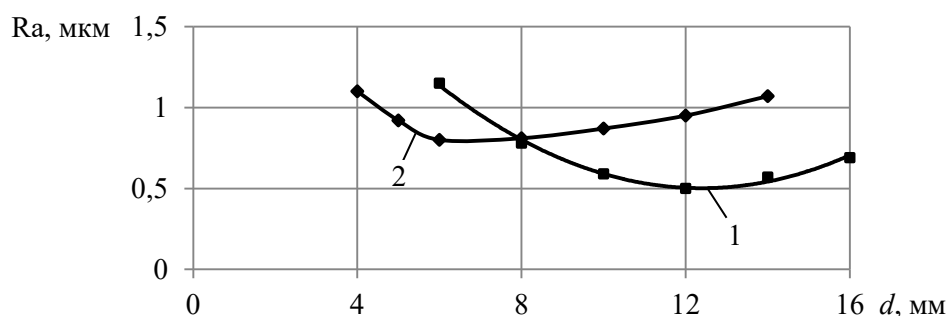
Основная часть. Шероховатость поверхностей упрочняемых заготовок измеряли на профилометре – профилографе Surftest SJ-210 фирмы Mitutoyo (Япония). Погрешность измерений не превышала 5 %. Измерение шероховатости поверхности заготовок выполняли на одной настройке прибора и температуре окружающей среды 18-20 °С. За величину шероховатости упрочненной поверхности заготовки принимали среднее значение пяти измерений. На каждом из исследуемых параметров процесса СМДН обрабатывали пять заготовок.

Совмещенную отделочно-упрочняющую обработку внутренней цилиндрической поверхности заготовок осуществляли на фрезерном станке с ЧПУ мод. FSS-400. В качестве обрабатываемых заготовок использовали кольца из стали 45, 40Х и серого чугуна СЧ20 соответствующей твердости с размерами ($D \times d \times l$) – 125×110×12 мм. Отверстия заготовок предварительно растачивали в размер Ø110Н8 с обеспечением соответствующей шероховатости.

Параметры комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров – 12 мм; материал деформирующих шаров – ШХ 15(62-65HRC); материал цилиндрических постоянных магнитов NdFeB; размер цилиндрических постоянных магнитов ($D \times h$) – 15×5 мм; количество магнитов, осуществляющих воздействие на деформирующие шары – 22 шт.; количество цилиндрических постоянных магнитов, осуществляющих намагничивание поверхностного слоя упрочняемых колец – 32 шт.; материал магнитопроводов – сталь Ст 3.

Режимы СМДН: частота вращения инструмента $n = 1600-4500 \text{ мин}^{-1}$ (окружная скорость инструмента – 552,6-1554,3 м/мин); осевая подача инструмента $S = 20-160 \text{ мм/мин}$; индукция вращающегося магнитного поля, действующего на упрочняющую поверхность заготовки, $B_{\text{дет}} = 0,130 \text{ Тл}$; индукция магнитной системы инструмента $B_{\text{мс}} = 0,350 \text{ Тл}$; количество рабочих ходов инструмента – один; смазочно-охлаждающая жидкость – масло индустриальное 45.

Исследование шероховатости поверхности от диаметра деформирующих шаров инструмента. На рисунке 1 представлены зависимости шероховатости поверхности заготовок от диаметра деформирующих шаров комбинированного инструмента.

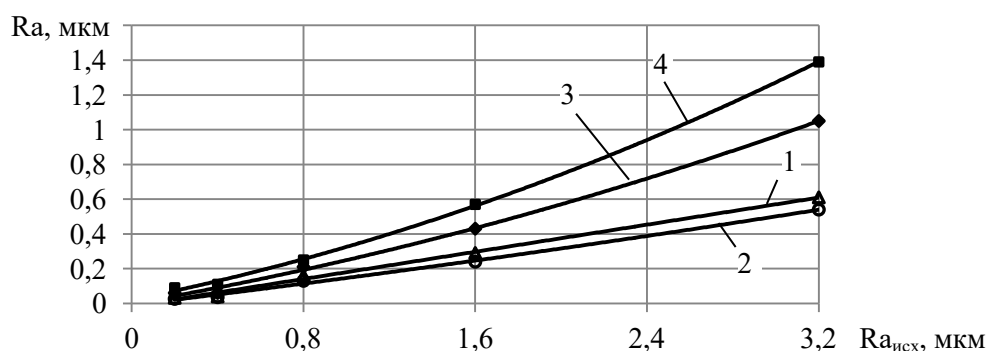


материал упрочняемых колец: 1 – сталь 45 (190-200 HB); 2 – сталь 45 (30-35 HRC)
 Рисунок 1. – Зависимость шероховатости поверхности от диаметра d деформирующих шаров комбинированного инструмента при следующих условиях процесса СМДН:
 $Ra_{исх} = 5,8-6,0$ мкм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 3150$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин

Из рисунка 1 видно, что оптимальными значениями диаметров деформирующих шаров для упрочнения СМДН заготовок являются: для стали 45 (190-200 HB) – 12 мм; для стали 45 (30-35 HRC) – 6 мм. При этом обеспечивается минимальная шероховатость поверхности по параметру Ra – 0,5 и 0,8 мкм соответственно.

С дальнейшим увеличением диаметра шаров комбинированного инструмента шероховатость упрочняемой поверхности начинает возрастать. Это связано с увеличением площади контакта деформирующих шаров с заготовкой и уменьшением величины удельного давления. Кроме того, снижаются характеристики колебаний деформирующих шаров вследствие изменения их силового взаимодействия с магнитной системой инструмента.

Исследование шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости упрочняемых заготовок. На рисунке 2 представлены зависимости шероховатости обработанной поверхности от исходной шероховатости поверхности заготовок при упрочнении СМДН.



1 – сталь 45 (190-200 HB); 2 – сталь 40X (180-190 HB);
 3 – сталь 45 (30-35 HRC); 4 – сталь 45 (40-45 HRC)

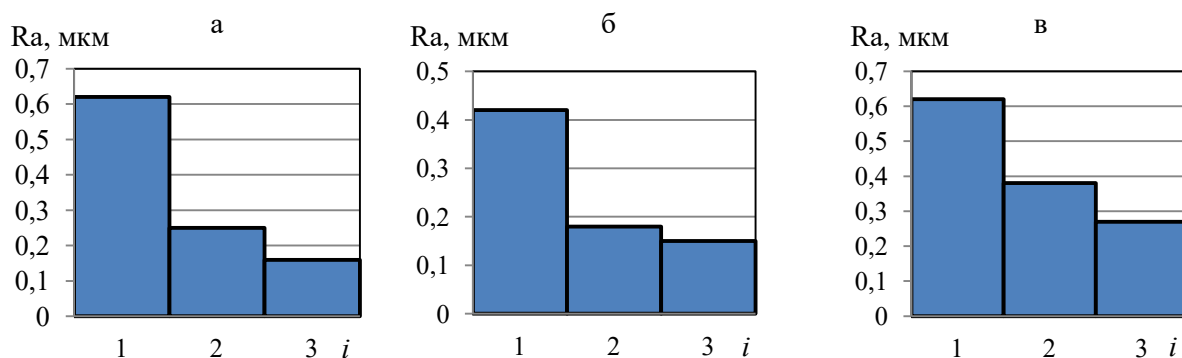
Рисунок 2. – Влияние исходной шероховатости поверхности заготовок на шероховатость поверхности после СМДН: $S = 20$ мм/мин; $d = 12$ мм; $n = 3150$ мин⁻¹; $B_{дет} = 0,130$ Тл

Анализ результатов исследований показал, что СМДН при высокой исходной шероховатости поверхности заготовки $Ra_{исх} = 3,0-3,2$ мкм, полученной чистовым рас-

тачиванием, обеспечивает снижение шероховатости в 5,3 раза (с Ra 3,20 до 0,60 мкм) для заготовок из стали 45 (190-200 HB) и в 5,7 раза (с Ra 3,20 до 0,56 мкм) для заготовок из стали 40X (180-190 HB), в 3,0 раза (с Ra 3,20 до 1,03 мкм) для стали 45 (30-35 HRC), в 2,3 раза (с Ra 3,20 до 1,40 мкм) для стали 45 (40-45 HRC).

Имеющиеся на рисунке 2 зависимости позволяют оценить технологические возможности метода СМДН и осуществить прогнозирование высоты микронеровностей поверхностей упрочняемых ферромагнитных заготовок с учетом их исходной шероховатости.

Исследование шероховатости поверхности от числа рабочих ходов комбинированного инструмента. На рисунке 3 представлены диаграммы изменения величины шероховатости внутренней поверхности колец из указанных материалов, обработанных лезвийным инструментом (расточиванием) и упрочненных СМДН.



а – сталь 45 (190-200 HB), условия осуществления процесса СМДН:

$Ra_{исх} = 5,2-5,7$ мкм; $d = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 3150$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин;

б – сталь 40X (180-190 HB), условия осуществления процесса СМДН:

$Ra_{исх} = 5,5-6,0$ мкм; $d = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 3150$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин;

в – серый чугун СЧ20 (150-160 HB), условия осуществления процесса СМДН:

$Ra_{исх} = 5,8-6,0$ мкм; $d = 12$ мм; $B_{дет} = 0,130$ Тл; $n = 2240$ мин⁻¹; $S = 20$ мм/мин

Рисунок 3. – Диаграммы изменения величины шероховатости внутренней поверхности колец от количества рабочих ходов i инструмента

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить следующее:

- при обработке колец из стали 45 (190-200 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности снижается в 9,2 раза, а с учетом второго – в 22,8 раза, третьего – в 35,5 раз (по отношению к исходной);

- при обработке колец из стали 40X (180-190 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности снижается в 13,9 раза, а с учетом второго – в 33,3 раза, третьего – в 40,0 раз;

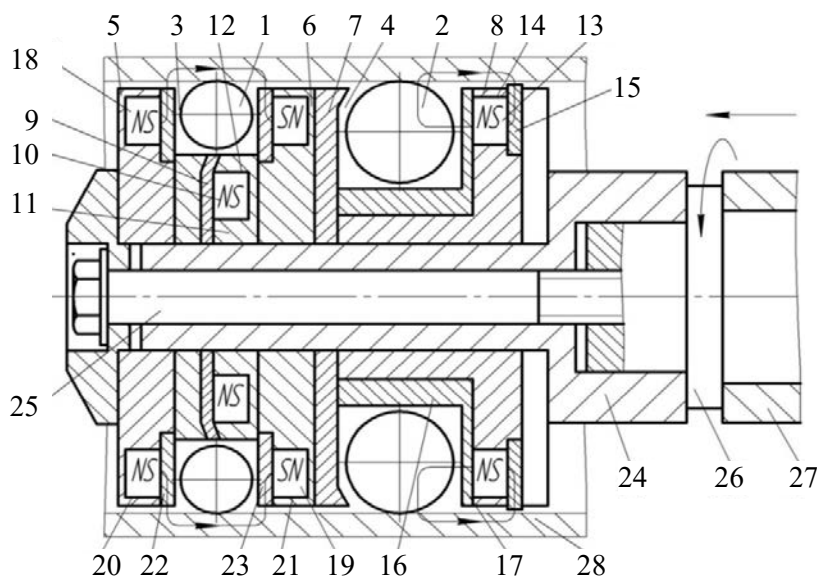
- при обработке колец из серого чугуна СЧ20 (150-160 HB) обеспечивается снижение исходной шероховатости за первый рабочий ход в 9,5 раза, за второй – в 15,1 раз, третий – в 20,7 раз.

Установлено, что наибольшее деформирование исходных микронеровностей заготовок осуществляется за первый рабочий ход инструмента.

Представленные на рисунке 3 диаграммы снижения высоты шероховатости поверхности ферромагнитных заготовок в зависимости от количества рабочих ходов инструмента указывают на перспективность разработки конструкции многорядного комбинированного инструмента для СМДН, кольцевые камеры с деформирующими шарами которого смещены в осевом направлении.

Разработка метода СМДН и инструмента, обеспечивающих повышение эффективности снижения шероховатости. Повышение эффективности снижения исходной шероховатости внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитных заготовок обеспечивает разработанный метод СМДН, в соответствии с которым последовательно осуществляют предварительную и окончательную упрочняющую обработки за один рабочий ход комбинированного инструмента. Предварительную (черновую) упрочняющую обработку осуществляют вращающимся магнитным полем и импульсно-ударным деформированием шарами малого диаметра, которым сообщают радиальные колебания. Окончательную (финишную) упрочняющую обработку проводят вращающимся магнитным полем и поверхностным пластическим деформированием, выполняемым шарами большего диаметра и с меньшей шероховатостью их сферической поверхности [8].

Для реализации предложенного метода СМДН и объединения предварительной и окончательной упрочняющих обработок в один технологический переход (одну операцию) спроектирован двухрядный комбинированный инструмент, изображенный на рисунке 4.



- 1, 2 – деформирующие шары; 3, 4 – кольцевые камеры; 5-8 – диски; 9 – зубчатый магнитопровод; 10, 13, 18, 19 – цилиндрические постоянные магниты; 11 – держатель; 12, 14, 20, 21 – аксиальные отверстия; 15 – магнитопроводная шайба; 16 – стакан; 17 – фланец; 22, 23 – кольцевые магнитопроводы; 24 – втулка; 25 – винт; 26 – оправка; 27 – шпиндель; 28 – ферромагнитная заготовка

Рисунок 4. – Двухрядный комбинированный инструмент для СМДН внутренних цилиндрических поверхностей

Комбинированный инструмент содержит два ряда деформирующих шаров 1, 2, смещенных в осевом направлении и установленных в кольцевых камерах 3, 4, образованных дисками 5, 6 и 7, 8 соответственно. Диаметр деформирующих шаров 1 существенно меньше диаметра деформирующих шаров 2. Кроме того, точность изготовления применяемых деформирующих шаров 2 на 1-2 класса выше. При этом деформирующие шары 2 имеют более низкую шероховатость сферической поверхности. Радиальные колебания деформирующим шарам 1 относительно упрочняемой поверхности сообщает магнитная система, имеющая: зубчатый магнитопровод 9; постоянные цилиндрические магниты 10; держатель 11 с равномерно расположенными аксиальными отверстиями 12.

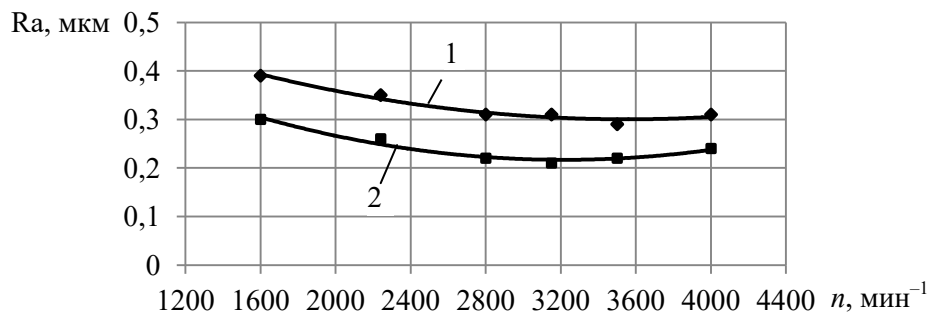
Для вращения деформирующих шаров 2 относительно продольной оси внутренней цилиндрической поверхности ферромагнитной заготовки предназначена магнитная система, в состав которой входят цилиндрические постоянные магниты 13, установленные в аксиальных отверстиях 14 диска 8, и кольцевая магнитопроводная шайба 15. В кольцевой камере 4 установлен стакан 16 с фланцем 17, исключаяющий механическое взаимодействие деформирующих шаров 2 с цилиндрическими постоянными магнитами 13.

Для одновременного воздействия на цилиндрическую поверхность ферромагнитной заготовки вращающимся магнитным полем предназначена система, состоящая из цилиндрических постоянных магнитов 18, 19, установленных в аксиальных отверстиях 20, 21 дисков 5, 6, и кольцевых магнитопроводов 22, 23. Диски 5-8, зубчатый магнитопровод 9, держатель 11 установлены соосно на втулке 24, закрепленной винтом 25 на оправке 26. Диски 5-8, держатель 11, стакан 16 с фланцем 17, втулка 24 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

Оправку 26 инструмента закрепляют в шпинделе 27 станка. Инструмент вводят в цилиндрическое отверстие упрочняемой ферромагнитной заготовки 28, сообщают ему вращение и перемещают с осевой подачей. В процессе совмещенной упрочняющей обработки деформирующие шары 1 (вследствие периодического действия вращающегося магнитного поля) осуществляют радиальные колебания и наносят динамические удары по упрочняемой поверхности, максимально деформируя исходные микронеровности. Затем обработанную поверхность заготовки 28 окончательно упрочняют деформирующие шары 2 и вращающееся магнитное поле, создаваемое цилиндрическими постоянными магнитами 13. Деформирующие шары 2 (в силу конструкции магнитной системы) прижимаются к цилиндрической поверхности заготовки, выполняют тангенциальные колебательные движения и осуществляют окончательное сглаживание оставшихся микронеровностей. Низкая шероховатость сферической поверхности деформирующих шаров 2 способствуют эффективному сглаживанию микронеровностей заготовки.

Предложенный метод СМДН и комбинированный инструмент для его осуществления позволяют за один технологический переход (одну операцию) выполнить предварительное и окончательное поверхностное пластическое деформирование и, тем самым, обеспечить максимальную степень деформации исходных микронеровностей поверхности ферромагнитной заготовки.

На рисунке 5 изображены графики зависимости шероховатости поверхности от частоты вращения инструмента при упрочнении по разработанному методу СМДН. Реализацию метода СМДН осуществляли на режимах, указанных ранее.



1 – сталь 45 (190-200 НВ); 2 – сталь 40X (180-190 НВ)

Рисунок 5. – Зависимость шероховатости поверхности от частоты вращения комбинированного инструмента, обеспечивающего совмещение предварительного и окончательного (финишного) упрочнения:

$Ra_{\text{исх}} = 5,8-6,0 \text{ мкм}$; $S = 20 \text{ мм/мин}$; $d_1 = 12 \text{ мм}$; $d_2 = 20 \text{ мм}$; $B_{\text{дет}} = 0,130 \text{ Тл}$

Параметры комбинированного инструмента: диаметр деформирующих шаров, осуществляющих предварительное поверхностное пластическое деформирование, составлял 12 мм (Ra 0,10 мкм), а осуществляющих окончательное деформирование – 20 мм (Ra 0,06 мкм). Максимальная индукция магнитного поля, создаваемого магнитной системой инструмента и действующего на деформирующие шары, составляла 0,350 Тл.

Таким образом, разработанный метод СМДН позволяет за один рабочий ход комбинированного инструмента (в зависимости от частоты его вращения) снизить исходную шероховатость поверхности стальных заготовок твердостью 190-200 HB с $Ra = 5,8-6,0$ мкм до $Ra = 0,2-0,3$ мкм, что указывает на его высокую эффективность.

Заклучение. Определены оптимальные диаметры деформирующих шаров комбинированного инструмента для СМДН при обработке поверхностей заготовок: из стали 45 (190-200 HB) – 12 мм; из стали 45 (30-35 HRC) – 6 мм.

Получены зависимости влияния исходной шероховатости поверхности стальных заготовок различной твердости на шероховатость упрочненной поверхности, позволяющие оценить технологические возможности метода СМДН и осуществить прогнозирование высоты микронеровностей поверхностей обрабатываемых ферромагнитных заготовок.

Выявлено, что при обработке СМДН нежестких колец: из стали 45 (190-200 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности $Ra_{исх} = 5,2-5,7$ мкм снижается в 9,2 раза, с учетом второго – в 22,8 раза, третьего – в 35,5 раз (до $Ra = 0,15-0,16$ мкм); из стали 40X (180-190 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности с $Ra_{исх} = 5,5-6,0$ мкм снижается в 13,9 раз, с учетом второго – в 33,3 раза, третьего – в 40,0 раз (до $Ra = 0,14-0,15$ мкм); из серого чугуна СЧ20 (150-160 HB) за первый рабочий ход инструмента исходная шероховатость поверхности с $Ra_{исх} = 5,8-6,0$ мкм снижается в 9,5 раза, за второй – в 15,1 раз, за третий – в 20,7 раз (до $Ra = 0,28-0,29$ мкм).

Установлено, что наибольшая деформация исходных микронеровностей ферромагнитных заготовок осуществляется за первый рабочий ход комбинированного инструмента.

Разработан метод СМДН, позволяющий совместить предварительную и окончательную (финишную) упрочняющие обработки и обеспечить за один рабочий ход инструмента эффективное снижение исходной шероховатости поверхности заготовок из сталей твердостью 190-200 HB с $Ra_{исх} = 5,8-6,0$ до 0,2-0,3 мкм. Для реализации предложенного метода СМДН спроектирован двухрядный комбинированный инструмент, кольцевые камеры с деформирующими шарами которого смещены в осевом направлении, диаметр деформирующих шаров возрастает от первой камеры к последующей, магнитная система первой кольцевой камеры обеспечивает радиальные, а второй – тангенциальные колебания деформирующих шаров.

Список использованных источников

1. Дидык, Р.П. Проблемы и перспективы горного машиностроения / Р.П. Дидык // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 16-17.
2. Технологические основы финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей в машиностроении / А.П. Минаков [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 251 с.

3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюл. № 31. – 7 с.

4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюл. № 25. – 7 с.

5. Довгалеv, А.М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А.М. Довгалеv // Обработка металлов (Технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18-35.

6. Довгалеv, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалеv. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

7. Шелег, В.К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В.К. Шелег, А.М. Довгалеv // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330-334.

8. Довгалеv, А.М. Повышение эффективности совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей ферромагнитных деталей / А.М. Довгалеv // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч. техн. конф., Могилев, 26-27 апр. 2018 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2018. – С. 28.

Информация об авторах

Валерий Константинович Шелег – Член-корреспондент НАН Беларуси, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: sheleh_v@tut.by.

Александр Михайлович Довгалеv – 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.

Иван Анатольевич Тарадейко – ассистент, Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

Information about the authors

Valery Konstantinovich Sheleg – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Professor, D. Sc. (Engineering), Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: sheleh_v@tut.by.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev – 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.

Ivan Anatolievich Taradeiko – assistant, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: IvanTaradeiko@yandex.ru.

Поступила в редакцию 12.03.2021 г.

УДК 621.65.01

В.Н. Павлечко*УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***ПАРАМЕТРЫ СРЕДЫ В КАНАЛАХ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛА НАКЛОНА ЛОПАСТЕЙ**

Аннотация. Уточнены зависимости для расчета скоростей и давления среды на лопасти центростремительной турбины при изменении угла наклона отдельных участков лопасти. Скорости движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, в тангенциальном и радиальном направлениях, а также давление среды в тангенциальном направлении выражаются похожими зависимостями и различаются только углами наклона участков лопастей. Формулы для определения давления в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, и радиальном направлении различаются как углами наклона участков, так и расчетными зависимостями.

Ключевые слова: центростремительная турбина, изменение угла наклона лопастей, направление потока, скорости, давление среды, отдельные участки лопастей.

V.N. Pavlechko*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***PARAMETERS OF THE MEDIUM IN THE INWARD-FLOW TURBINE CHANNELS WHEN CHANGING THE INCLINATION ANGLE OF THE BLADES**

Abstract. Dependencies for calculating speed and medium pressure on the blades of inward-flow turbine when changing the inclination angle of sections of the blade are clarified. Medium speed in the direction perpendicular to the blade platform in tangential and radial directions, as well as medium pressure in tangential direction are expressed by similar dependencies and differ only in the inclination angles of blade sections. Formulae for determining the pressure in the direction perpendicular to the blade platform and in radial direction differ both in the inclination angle of sections and in the calculated dependencies.

Keywords: inward-flow turbine, change of blade inclination angle, flow direction, speed, medium pressure, sections of the blades.

Введение. Основным уравнением при определении параметров турбины является уравнение Эйлера [1, 2], в котором отсутствует угол наклона лопастей, являющийся одним из важнейших показателей турбины. Кроме того, в известном уравнении не указана величина воздействия среды на лопасти в промежутке между начальным и конечным участками по ходу движения среды при изменении угла наклона лопастей.

Ранее получены зависимости для определения скоростей движения среды и лопасти, а также давления среды на лопасть при вводе потока радиально [3, 4] и под некоторым углом α к направлению, обратному окружной скорости (рисунок 1) [5-7]. Найденные выражения справедливы только для начального участка лопасти по ходу движения рабочей среды и при неизменном его значении по радиусу.

Начальная скорость среды v_{si} представлена в виде и тангенциальной v_{sui} и радиальной v_{sri} составляющих (рисунок 1), с которыми среда воздействует на элемен-

тарный участок лопасти AB в тангенциальном и радиальном направлениях. Величины этих скоростей определяются зависимостями [5-7]:

$$v_{sui} = v_{si} \cos \alpha; \quad (1)$$

$$v_{sri} = v_{si} \sin \alpha. \quad (2)$$

В работе [5] предложено рассчитывать обобщенные скорости движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти c_i , в тангенциальном c_{ui} и радиальном c_{ri} направлениях (рисунок 2) соответствующими выражениями:

$$c_i = v_{si} \sin(\beta + \alpha); \quad (3)$$

$$c_{ui} = v_{si} \sin \beta \cdot \sin(\beta + \alpha); \quad (4)$$

$$c_{ri} = v_{si} \cos \beta \cdot \sin(\beta + \alpha), \quad (5)$$

где β – угол между плоскостью участка лопасти и касательной к окружности турбины, град (рад).

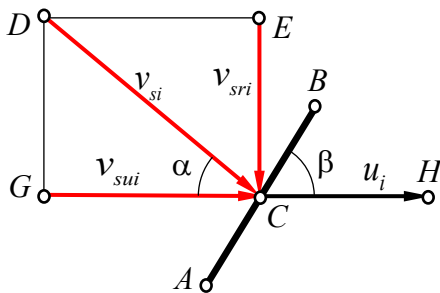


Рисунок 1. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку

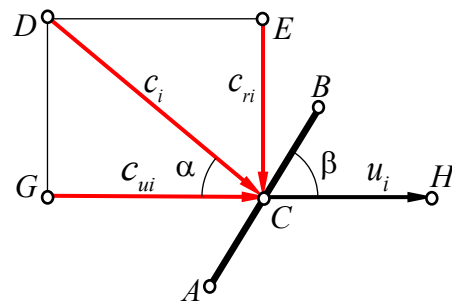


Рисунок 2. – Обобщенные скорости воздействия среды на элементарную площадку

Обобщенные давления среды на лопасть в направлении, перпендикулярном плоскости элементарного участка лопасти p_i , в тангенциальном p_{ui} и радиальном p_{ri} направлениях определяются по формулам [7]:

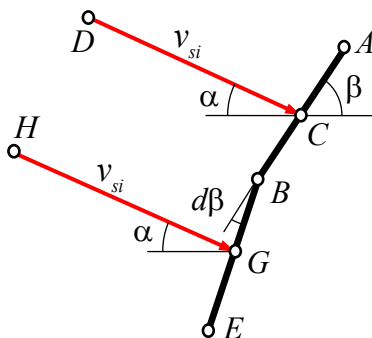


Рисунок 3. – Скорости воздействия среды на элементарные площадки

$$p_i = \rho v_{si}^2 \frac{\sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta}; \quad (6)$$

$$p_{ui} = \rho v_{si}^2 \sin^2(\beta + \alpha); \quad (7)$$

$$p_{ri} = \rho v_{si}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin^2(\beta + \alpha), \quad (8)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 .

Результаты исследований. Рассмотрим зависимость расчетных формул скоростей среды и создаваемых ими давлений на лопасть при других углах ее наклона. На $(i+1)$ -ый элементарный участок лопасти BE , наклоненный под углом $\beta_{i+1} = \beta_i + d\beta$ к направлению, обратному окружной скорости, среда воздействует со скоростью v_{si} , вектор между которой и касательной к окружности лопастей турбины имеет то же значение угла α (рисунок 3). Выразим обобщенную скорость движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости элементарного участка лопасти BE , по аналогии с формулой (3):

$$c_{i+1} = v_{si} \sin(\beta + d\beta + \alpha) = v_{si} [\sin(\beta + \alpha) + \cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta - \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta]. \quad (9)$$

Проинтегрируем второй и третий члены правой части полученной зависимости с учетом того, что угол α имеет постоянное значение, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, а согласно [8]:

$$\int \cos \beta d\beta = \sin \beta; \quad \int \sin \beta d\beta = -\cos \beta, \quad (10)$$

и в результате решения получаем:

$$c_{i+1} = v_{si} \left[\sin(\beta + \alpha) + \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos \beta d\beta - \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta d\beta \right] = v_{si} \sin(\beta_1 + \alpha). \quad (11)$$

По аналогии с формулой (4) обобщенная скорость движения среды в тангенциальном направлении определяется зависимостью:

$$c_{u,i+1} = v_{si} \sin(\beta + d\beta) \cdot \sin(\beta + d\beta + \alpha) = v_{si} [\sin \beta \cdot \sin(\beta + \alpha) + 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta + \cos^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta - \sin^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta]. \quad (12)$$

При интегрировании второго, третьего и четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол α не изменяется, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, и в соответствии с [8]:

$$\int \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta = \frac{\sin^2 \beta}{2}; \quad \int \cos^2 \beta d\beta = \frac{\beta}{2} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{2}; \quad \int \sin^2 \beta d\beta = \frac{\beta}{2} - \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{2}, \quad (13)$$

в результате несложных преобразований получаем:

$$c_{u,i+1} = v_{si} \left[\sin \beta \cdot \sin(\beta + \alpha) + 2 \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta + \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta d\beta - \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin^2 \beta d\beta \right] = v_{si} \sin \beta_1 \cdot \sin(\beta_1 + \alpha). \quad (14)$$

Обобщенная скорость движения среды в радиальном направлении по аналогии с формулой (5) определяется выражением:

$$\begin{aligned} c_{r,i+1} &= v_{si} \cos(\beta + d\beta) \cdot \sin(\beta + d\beta + \alpha) = \\ &= v_{si} [\cos \beta \cdot \sin(\beta + \alpha) - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta + \\ &+ \cos^2 \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta - \sin^2 \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta]. \end{aligned} \quad (15)$$

В результате интегрирования второго, третьего и четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол α имеет постоянное значение, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, с учетом (13) и [8]:

$$\int \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta = -\frac{\cos^2 \beta}{2},$$

получаем:

$$\begin{aligned} c_{r,i+1} &= v_{si} \left[\cos \beta \cdot \sin(\beta + \alpha) - 2 \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta + \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta d\beta - \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin^2 \beta d\beta \right] = \\ &= v_{si} \cos \beta_1 \cdot \sin(\beta_1 + \alpha). \end{aligned} \quad (16)$$

Сравнительный анализ формул (3)-(5), характеризующих скорости воздействия среды на элементарный участок AB , наклоненный под углом β к направлению, обратному окружной скорости лопасти, и соответствующих формул (11), (14) и (16), касающихся элементарного участка лопасти BE , наклоненного под углом β_1 , показывает, что они аналогичны и отличаются только углами наклона участков.

По аналогии с формулой (6) обобщенное давление среды в направлении, перпендикулярном плоскости $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти BE , характеризуется выражением:

$$p_{i+1} = \rho v_{si}^2 \frac{\sin^2(\beta + d\beta + \alpha)}{\sin^2(\beta + d\beta)} = \rho v_{si}^2 \left[\frac{\sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + 2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cos 2\alpha \cdot \sin d\beta + \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta - \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta \right]. \quad (17)$$

При выводе зависимости принято допущение, что для числителя и знаменателя $\sin^2 d\beta = 0$, для знаменателя $\sin d\beta = 0$. Проинтегрируем второй, третий и четвертый члены правой части полученного выражения с учетом того, что угол α не изменяется, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, а согласно [8]:

$$\int \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta = \ln |\sin \beta|; \quad \int \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta = -\frac{\cos \beta}{\sin \beta} - \beta, \quad (18)$$

в результате решения получаем:

$$p_{i+1} = \rho v_{si}^2 \left[\frac{\sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + 2 \cos 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta + \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta - \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} d\beta \right] = \\ = \rho v_{si}^2 \left[\frac{\sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + 2 \cos 2\alpha \cdot \ln \left| \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} \right| + \sin 2\alpha \left(\frac{\cos \beta}{\sin \beta} - \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} + 2\beta - 2\beta_1 \right) \right]. \quad (19)$$

Сформулируем обобщенное давление среды в тангенциальном направлении для $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти BE по аналогии с формулой (7):

$$p_{u,i+1} = \rho v_{si}^2 \sin^2(\beta + d\beta + \alpha) = \rho v_{si}^2 \left[\sin^2(\beta + \alpha) + 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos 2\alpha \cdot \sin d\beta + \cos^2 \beta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta - \sin^2 \beta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta \right]. \quad (20)$$

При выводе зависимости (20) принято допущение, что $\sin^2 d\beta = 0$. В результате интегрирования второго, третьего и четвертого членов правой части полученной формулы с учетом того, что угол α имеет постоянное значение, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, $\sin^2 d\beta \approx 0$, и с учетом (14) получаем:

$$p_{u,i+1} = \rho v_{si}^2 \left[\sin^2(\beta + \alpha) + 2 \cos 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta + \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta d\beta - \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin^2 \beta d\beta \right] = \\ = \rho v_{si}^2 [\sin^2(\beta + \alpha) + \cos 2\alpha (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta) + \sin 2\alpha (\sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1 - \sin \beta \cdot \cos \beta)]. \quad (21)$$

Добавим к правой части полученного уравнения

$$\pm \cos^2 \beta_1 \cdot \sin^2 \alpha; \quad \pm \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \alpha,$$

и после преобразований формула (21) упрощается до вида:

$$p_{u,i+1} = \rho v_{si}^2 \sin^2(\beta_1 + \alpha). \quad (22)$$

По аналогии с формулой (8) обобщенное давление среды в радиальном направлении для $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти BE определяется в виде:

$$\begin{aligned} p_{r,i+1} = & \rho v_{si}^2 \frac{\cos^2(\beta + d\beta)}{\sin^2(\beta + d\beta)} \sin^2(\beta + d\beta + \alpha) = \rho v_{si}^2 \left[\frac{\cos^2 \beta \cdot \sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + \right. \\ & + 2 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \cdot \sin d\beta - 6 \cos^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta + \\ & \left. + 2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin d\beta \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

При этом принято допущение, что для числителя и знаменателя $\sin^2 d\beta = 0$, для знаменателя $\sin d\beta = 0$. Добавим к правой части полученной формулы:

$$\pm 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \alpha; \quad \pm 2 \cos^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha,$$

и после преобразований формула (23) приобретает вид:

$$\begin{aligned} p_{r,i+1} = & \rho v_{si}^2 \left[\frac{\cos^2 \beta \cdot \sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + 4 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} \cos 2\alpha \cdot \sin d\beta - \right. \\ & \left. - 4 \cos^2 \beta \cdot \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta + \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta - 2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cos^2 \alpha \cdot \sin d\beta \right]. \end{aligned} \quad (24)$$

В результате интегрирования второго–четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол α имеет постоянное значение, $\beta_1 = \beta_i + d\beta$, для малых углов $\sin d\beta = d\beta$, и с учетом (13), после несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} p_{r,i+1} = & \rho v_{si}^2 \left[\frac{\cos^2 \beta \cdot \sin^2(\beta + \alpha)}{\sin^2 \beta} + 4 \cos 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} d\beta - 4 \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta \cdot d\beta + \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta - \right. \\ & \left. - 2 \cos^2 \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta \right] = \rho v_{si}^2 \left[\frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin^2(\beta + \alpha) + 2(\cos^2 \beta_1 - \cos^2 \beta) \cos 2\alpha + \right. \\ & \left. + 2(\cos^2 \alpha - 2 \sin^2 \alpha) \ln \left| \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} \right| - \left(2 \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1 - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta + \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} - \frac{\cos \beta}{\sin \beta} + 3\beta_1 - 3\beta \right) \sin 2\alpha \right]. \end{aligned} \quad (25)$$

Сравнение выражений давлений среды (6) и (8) с соответствующими им формулами (19) и (25) показывает, что они различаются не только углами наклона участков лопастей, но и расчетными зависимостями. Формулы (7) и (22) аналогичны и различаются только разными углами наклона лопастей.

Выводы. Скорости движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, в тангенциальном и радиальном направлениях, а также давление в тангенциальном направлении выражаются аналогичными формулами и различаются только углами наклона участков лопастей. Формулы для определения давления в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, и в радиальном направлении различаются как углами наклона участков, так и расчетными зависимостями.

Список использованных источников

1. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.
2. Смирнов, И.Н. Гидравлические турбины и насосы / И.Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1969. – 400 с.
3. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центростремительной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Химическая промышленность. – 2017. – Т. 94, № 5. – С. 247-254.
4. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 35-43.
5. Павлечко, В.Н. Скорости и давления в центростремительной турбине при начальной закрутке наружного потока среды / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 1. – С. 19-29.
6. Павлечко, В.Н. О влиянии центробежной силы на параметры центростремительной турбины / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 39-46.
7. Павлечко, В.Н. Изменение тангенциального давления среды на лопасти в каналах центростремительной турбины / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 67-73.
8. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1978. – С. 84-98.

Информация об авторе

Владимир Никифорович Павлечко – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств, УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: paulechka@tut.by.

Information about the author

Uladzimir Nikiforovich Paulechka – Ph. D. in Engineering sciences, Associate Professor of the Machines and Equipment of Chemical and Silicate Industries Department, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., Minsk, 220006, Belarus), e-mail: paulechka@tut.by.

Поступила в редакцию 14.05.2021 г.

УДК 622.253.6:539.319

Г.П. Бровка¹, Н.Н. Шилович²¹*Институт природопользования НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*²*Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Беларусь***МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛОГО ЦИЛИНДРА С НЕПОДВИЖНОЙ ВНЕШНЕЙ БОКОВОЙ ГРАНИЦЕЙ ПРИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ**

Аннотация. В данной статье рассматриваются эталонные аналитические решения и соответствующие численные решения деформации двухслойного полого цилиндра с неподвижной внешней боковой границей в осесимметричной постановке.

Ключевые слова: деформация, перемещение, уравнение, система, граница, слой.

G.P. Brovka¹, N.N. Shilovich²¹*Nature Management Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*²*Belarus State Economic University, Minsk, Belarus***SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF INHOMOGENEOUS QUILL CYLINDER WITH A FIXED EXTERNAL LATERAL BOUNDARY UNDER AXISYMMETRIC LOAD**

Abstract. This article considers model analytical solutions and relevant numerical solutions of double-layer quill cylinder deformation with a fixed external lateral boundary in axisymmetric position.

Keywords: deformation, moving, equation, system, boundary, layer.

Введение. Эталонные аналитические решения задач деформации горных пород необходимы прежде всего для тестирования численных методов решения таких задач, так как очень часто сложно доказать аналитическими методами точность и сходимость разрабатываемых расчетных схем численного моделирования процессов напряженно-деформируемого состояния в горных породах при их разработке. Ранее авторами была опубликована статья [1], в которой рассмотрены эталонные аналитические решения и соответствующие численные решения деформации полого однородного цилиндра с неподвижной внешней боковой границей в осесимметричной постановке. При этом, в отличие от классической постановки задач деформации в соответствии с моделью Гука, относительные деформации рассчитываются в привязке не к исходному размеру элементов, а к соответствующему текущему их значению. Развивая указанную тему, в данной статье приводятся аналитические и численные решения для двухслойного полого цилиндра с неподвижной внешней боковой границей в осесимметричной постановке.

Предложенные аналитические решения можно использовать в качестве эталонных решений для тестирования соответствующих численных методов расчета деформационных процессов в вертикальных горных выработках.

Деформация неоднородного полого цилиндра – аналитическое решение. Рассмотрим неоднородный полый цилиндр, состоящий из двух вложенных цилиндров из разных материалов (рисунок 1), на который воздействует внешняя нагрузка P , направленная вдоль оси цилиндра.

Как и в случае однородного цилиндра, деформации, вызванные нагрузкой P , симметричны относительно оси цилиндра и не меняются по его длине [2]. Запишем уравнения состояний для каждого слоя цилиндра в отдельности (рисунок 2):

цилиндр а: $a \leq r \leq d$

$$\varepsilon_r^a = \frac{du_a}{dr};$$

$$\sigma_r^a = E_a \frac{\varepsilon_r^a(1-\mu_a) + \mu_a(\varepsilon_t^a + \varepsilon)}{1-\mu_a-2\mu_a^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_t^a = \frac{u_a}{r};$$

$$\sigma_t^a = E_a \frac{\varepsilon_t^a(1-\mu_a) + \mu_a(\varepsilon_r^a + \varepsilon)}{1-\mu_a-2\mu_a^2}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_z^a = \frac{d\omega_a}{dz} = \varepsilon; \quad (3)$$

цилиндр б: $d \leq r \leq b$

$$\varepsilon_r^b = \frac{du_b}{dr};$$

$$\sigma_r^b = E_b \frac{\varepsilon_r^b(1-\mu_b) + \mu_b(\varepsilon_t^b + \varepsilon)}{1-\mu_b-2\mu_b^2}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_t^b = \frac{u_b}{r};$$

$$\sigma_t^b = E_b \frac{\varepsilon_t^b(1-\mu_b) + \mu_b(\varepsilon_r^b + \varepsilon)}{1-\mu_b-2\mu_b^2}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_z^b = \frac{d\omega_b}{dz} = \varepsilon, \quad (6)$$

где a, b, d – радиусы цилиндров;

E_a, E_b и μ_a, μ_b – модули упругости и коэффициенты Пуассона для материала цилиндров а и б, соответственно;

σ_r, σ_t – напряжения на элементе цилиндра в радиальном и окружном (тангенциальном) направлениях.

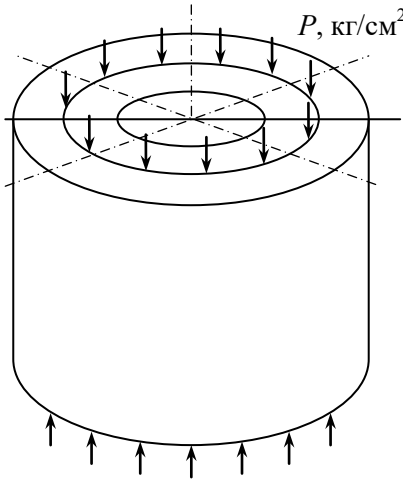
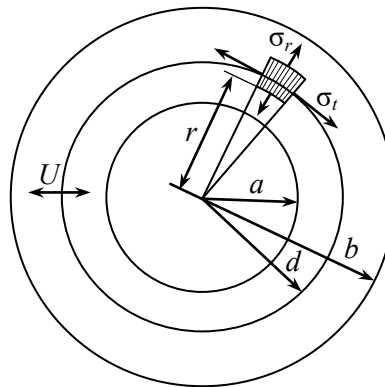


Рисунок 1. – Схема воздействия вертикальной нагрузки на цилиндр



r – координата в радиальном направлении
Рисунок 2. – Напряженно-деформированное состояние элемента стенки цилиндра

В рассматриваемой задаче цилиндры подвергаются постоянной осевой деформации $\varepsilon_z = d\omega/dz$, где ω – перемещение элемента mm_1n_1n цилиндра вдоль оси Z , т.е. относительные удлинения цилиндров вдоль их оси заданы и равны: $\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon$.

Отметим основные моменты модельной задачи деформации однородного полого цилиндра при осесимметричной нагрузке [1]: перемещение цилиндра было постоянно в окружном направлении и менялось только по радиусу, т.е. относительное удлинение в радиальном направлении $\varepsilon_r = du/dr$, а в окружном направлении, соответственно – $\varepsilon_t = u/r$, где u – перемещение слоя цилиндра в радиальном направлении. Относительное удлинение цилиндра вдоль его оси задано и равно $\varepsilon_z = d\omega/dz$. По известным соот-

ношениям между напряжениями и деформациями [3] в линейной постановке эта задача сводилась к решению дифференциального уравнения второго порядка относительно перемещений [2]: $\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0$, общее решение которого имело вид: $U = C_1 \cdot r + C_2/r$.

Константы C_1 и C_2 находились из краевых условий на внутренней и внешней поверхностях цилиндра. Это классическое решение для полого цилиндра хорошо известно и достаточно обоснованно.

Далее, в работе [1] было отмечено, что такой классический подход определяет радиальную деформацию только в первом – линейном приближении для сплошных сред. При решении таких задач для дисперсных сред могут возникнуть ситуации, когда более адекватной моделью деформации будет модель с расчетом относительной деформации в привязке к текущему значению радиальной координаты. Предпосылкой такого подхода является предположение о том, что для дисперсных сред при изменении размеров их структурных элементов изменяются их деформационные характеристики за счет изменения концентрации структурных элементов в направлении деформации. Так, при сжатии среды происходит уплотнение ее структурных единиц, а при растяжении, наоборот, происходит рассредоточение структурных элементов, что в первом приближении пропорционально отношению исходного радиуса к текущему его значению. Таким образом, в этом случае при расчете относительной деформации необходимо использовать отношение деформации к текущему значению радиального элемента.

Вследствие радиального перемещения U , текущее значение радиуса точки цилиндра определится как $r = r_0 - U(r_0)$. Относительную радиальную деформацию $\varepsilon_r = \partial U / \partial r$ для переменной r можно записать в старой системе координат, привязанной к первоначальным значениям радиуса r_0 :

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\partial U}{\partial (r_0 - U(r_0))} = \frac{\partial U}{\partial r_0 - \partial U(r_0)} = \frac{\partial U}{\partial r_0 \left(1 - \frac{\partial U}{\partial r_0}\right)}.$$

При этом, уравнение равновесия сил для элемента цилиндра $\frac{d(\sigma_r \cdot r)}{dr} = \sigma_t$ записывается в старой системе координат, привязанной к значениям радиуса r_0 :

$$\frac{d(\sigma_r \cdot (r_0 - u))}{dr_0} = \sigma_t \cdot (1 - \varepsilon_r),$$

где

$$\varepsilon_r = du/dr_0.$$

Данное уравнение, записанное через перемещение U , приводится к нелинейному дифференциальному уравнению 2-го порядка:

$$(1 - \mu) \frac{d^2 U}{dr_0^2} + \left(\frac{dU}{dr_0} - \frac{U}{r_0} \right) \cdot \left[\frac{(1 - 2\mu) \cdot (1 - (dU/dr_0))}{r_0 - U} + \frac{\mu}{r_0} \right] = 0,$$

для которого в работе [1] найдено точное аналитическое решение:

$$U = r_0 - \left(C_2 - \frac{C_1}{2r_0^2} \right)^{\frac{1}{1 + \frac{1-2\mu}{1-\mu}}} \cdot r_0.$$

Используя разработанный подход, найдем аналогичные решения для двухслойного цилиндра. В линейной постановке данная задача решается следующим образом. Для каждого слоя цилиндра имеется общее решение однослойного цилиндра:

$$U_a = C_1 \cdot r + C_2/r - \text{для } a \leq r \leq d \text{ и } U_b = C_3 \cdot r + C_4/r - \text{для } d \leq r \leq b. \quad (7)$$

Константы C_1, C_2, C_3, C_4 в решении (7) находятся из краевых условий на внутренней и внешней поверхностях цилиндра. При этом учитывается, что снаружи цилиндра охвачен жестким кожухом, и для внешней поверхности перемещение равно нулю, а для внутренней поверхности, соответственно – напряжение σ_r равно нулю, т.е. можно записать:

$$1) r = b - \text{нет перемещений, т.е. } U|_{r=b} = C_3 \cdot b + C_4/b = 0.$$

$$2) r = a - \text{нет напряжений, т.е. } \sigma|_{r=a} = C_1 + \frac{C_2 \cdot (2\mu_a - 1)}{a^2} + \mu_a \varepsilon = 0, \text{ где } \mu - \text{коэффициент Пуассона.}$$

Соответственно, еще 2 условия записывались на границе раздела 2-х цилиндров:

$$3) r = d - \text{равны перемещения цилиндров на границе } d, \text{ т.е. } U_b|_{r=d} = U_a|_{r=d} \text{ или, используя выражения для перемещений } U_a \text{ и } U_b: C_1 \cdot d + C_2/d = C_3 \cdot d + C_4/d.$$

$$4) r = d - \text{равны радиальные напряжения цилиндров на границе } d: \sigma_r^b|_{r=d} = \sigma_r^a|_{r=d}.$$

$$C_1 + \frac{C_2 \cdot (2\mu_a - 1)}{d^2} + \mu_a \varepsilon = \left[C_3 + \frac{C_4 \cdot (2\mu_b - 1)}{d^2} + \mu_b \varepsilon \right] \cdot \mu^*, \text{ где } \mu^* = \frac{E_b}{E_a} \frac{1 - \mu_a - 2\mu_a^2}{1 - \mu_b - 2\mu_b^2}.$$

Определение неизвестных констант C_1, C_2, C_3, C_4 сводилось к решению системы линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} C_3 \cdot b + \frac{C_4}{b} = 0; \\ C_1 + \frac{C_2 \cdot (2\mu_a - 1)}{a^2} + \mu_a \varepsilon = 0; \\ C_1 \cdot d + \frac{C_2}{d} = C_3 \cdot d + \frac{C_4}{d}; \\ C_1 + \frac{C_2 \cdot (2\mu_a - 1)}{d^2} + \mu_a \varepsilon = \left[C_3 + \frac{C_4 \cdot (2\mu_b - 1)}{d^2} + \mu_b \varepsilon \right] \cdot \mu^*. \end{cases}$$

В итоге константы имели вид:

$$C_1 = -\frac{\varepsilon \left[(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)E_a \mu_a (2\mu_b^2 + \mu_b - 1) - E_b (1 + \mu_a) (d^2 (b^2 - d^2) \mu_b + \mu_a (2(a^2 b^2 - b^2 d^2 + d^4) \mu_b - a^2 (b^2 + d^2))) \right]}{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)E_a (2\mu_b^2 + \mu_b - 1) + E_b (1 + \mu_a) (2d^2 \mu_a - a^2 - d^2) (2b^2 \mu_b - b^2 - d^2)};$$

$$C_2 = -\frac{a^2 d^2 \varepsilon E_b (1 + \mu_a) ((b^2 - d^2) \mu_b + \mu_a (2b^2 \mu_b - b^2 - d^2))}{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)E_a (2\mu_b^2 + \mu_b - 1) + E_b (1 + \mu_a) (2d^2 \mu_a - a^2 - d^2) (2b^2 \mu_b - b^2 - d^2)};$$

$$C_3 = -\frac{d^2 \varepsilon (E_b \mu_b (1 + \mu_a) (a^2 + d^2 - 2d^2 \mu_a) - E_a \mu_a (a^2 - d^2) (2\mu_b^2 + \mu_b - 1))}{(a^2 - d^2)(b^2 - d^2)E_a (2\mu_b^2 + \mu_b - 1) + E_b (1 + \mu_a) (2d^2 \mu_a - a^2 - d^2) (2b^2 \mu_b - b^2 - d^2)};$$

$$C_4 = \frac{b^2 d^2 \varepsilon (E_b (1 + \mu_a) (a^2 + d^2 - 2d^2 \mu_a) - E_a \mu_a (a^2 - d^2) (2\mu_b^2 + \mu_b - 1))}{(a^2 - d^2) (b^2 - d^2) E_a (2\mu_b^2 + \mu_b - 1) + E_b (1 + \mu_a) (2d^2 \mu_a - a^2 - d^2) (2b^2 \mu_b - b^2 - d^2)}.$$

Рассмотрим теперь нелинейную задачу для двухслойного цилиндра. Поскольку уравнение равновесия для обоих цилиндров одно и то же, то и решения запишем как:

$U_a = r_0 - (C_2 - C_1/2r_0^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} \cdot r_0$ – для цилиндра а, и $U_b = r_0 - (C_4 - C_3/2r_0^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}} \cdot r_0$ – для цилиндра б. Неизвестные константы C_1, C_2, C_3 и C_4 , также как и в линейной задаче, находятся из граничных условий:

$$1) r_0 = b - \text{нет перемещения, т.е. } U|_{r_0=b} = b - (C_4 - C_3/2b^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}} \cdot b = 0.$$

2) $r_0 = a$ – нет напряжения на внутренней поверхности цилиндра а, т.е. $\sigma_r^a|_{r_0=a} = 0$ или, как в случае с однородным цилиндром, имеем:

$$\sigma_r^a|_{r_0=a} = (C_2 - C_1/2a^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} + (1 - \mu_a) a \left[(C_2 - C_1/2r_0^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} \right]' \Big|_{r_0=a} - (1 + \mu_a \varepsilon) = 0.$$

3) $r_0 = d$ – равны перемещения цилиндров на границе d , т.е. $U_b|_{r_0=d} = U_a|_{r_0=d}$ или, используя выражения для перемещений U_a и U_b : $(C_2 - C_1/2d^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} = (C_4 - C_3/2d^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}}$.

4) $r_0 = d$ – равны радиальные напряжения цилиндров на границе d , т.е. $\sigma_r^b|_{r_0=d} = \sigma_r^a|_{r_0=d}$ или, с учетом выражений (1), (2), (4), (5) для σ , имеем:

$$\begin{aligned} & (C_2 - C_1/2d^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} + (1 - \mu_a) d \left[(C_2 - C_1/2d^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} \right]' \Big|_{r_0=d} - (1 + \mu_a \varepsilon) = \\ & = \left((C_4 - C_3/2d^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}} + (1 - \mu_b) d \left[(C_4 - C_3/2d^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}} \right]' \Big|_{r_0=d} - (1 + \mu_b \varepsilon) \right) \cdot \mu^*, \end{aligned}$$

$$\text{где } \mu^* = \frac{E_b}{E_a} \frac{1 - \mu_a - 2\mu_a^2}{1 - \mu_b - 2\mu_b^2}.$$

Таким образом, определение неизвестных констант C_1, C_2, C_3, C_4 свелось к решению системы нелинейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} C_3/2b^2 + 1 = C_4; \\ (C_2 - C_1/2a^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} \cdot \left[\frac{2C_1(1-\mu_a)^2}{(C_1 - 2C_2a^2)(2-3\mu_a)} - 1 \right] = 1 + \mu_a \varepsilon; \\ (C_2 - C_1/2d^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} = (C_4 - C_3/2d^2)^{\frac{1-\mu_b}{2-3\mu_b}}; \\ (C_2 - C_1/2d^2)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a}} \cdot \left(\frac{2C_1(1-\mu_a)^2}{(C_1 - 2C_2d^2)(2-3\mu_a)} - \mu^* \cdot \left[\frac{2C_3(1-\mu_b)^2}{(C_3 - 2C_4d^2)(2-3\mu_b)} - 1 \right] - 1 \right) = \mu^* \cdot (1 + \mu_b \varepsilon) - 1 - \mu_a \varepsilon. \end{cases}$$

Как и в задаче с однородным цилиндром, система нелинейных алгебраических уравнений решается численно при заданных значениях a, b, d, E_a, E_b, μ_a и μ_b . В качест-

ве численного метода решения данной системы уравнений воспользуемся методом простых итераций, для чего преобразуем ее к следующему виду:

$$\begin{cases} C_1 = 2a^2 \left(C_2 - \left(\frac{1}{1+\mu_a \varepsilon} \left[\frac{2C_1(1-\mu_a)^2}{(C_1-2C_2a^2)(2-3\mu_a)} - 1 \right] \right)^{\frac{2-3\mu_a}{\mu_a-1}} \right); \\ C_2 = \left(\frac{1}{\mu^* \cdot (1+\mu_b \varepsilon) - 1 - \mu_a \varepsilon} \left[\frac{2C_1(1-\mu_a)^2}{(C_1-2C_2d^2)(2-3\mu_a)} - \mu^* \cdot \left[\frac{2b^2C_3(1-\mu_b)^2}{(C_3(b^2-d^2)-2b^2d^2)(2-3\mu_b)} - 1 \right] - 1 \right] \right)^{\frac{2-3\mu_b}{\mu_b-1}} + \frac{C_1}{2d^2}; \\ C_3 = \frac{2b^2d^2}{d^2-b^2} \left(\left(C_2 - \frac{C_1}{2d^2} \right)^{\frac{1-\mu_a}{2-3\mu_a} \frac{2-3\mu_b}{1-\mu_b}} - 1 \right). \end{cases}$$

Записав уравнения итерационного процесса в более компактном виде

$$\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_1(C) \\ \Phi_2(C) \\ \Phi_3(C) \end{pmatrix}, \text{ за начальное приближение искомого вектора } C^1 = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} \text{ возьмем его}$$

значение из линейной задачи деформации, для которой константы выражаются в явном виде. Тогда итерационный процесс примет вид: $C^{n+1} = \Phi(C^n)$, где C – вектор-корень; C_1, C_2, C_3 – значения констант из линейной задачи деформации; Φ – итерирующая вектор-функция; Φ_1, Φ_2, Φ_3 – функции, выполняющие сжимающее отображение в $x \in R^n$. Данный метод простых итераций был реализован с использованием пакета прикладных программ “Wolfram Mathematica”.

В качестве иллюстрации приведены расчеты для конкретных значений радиусов цилиндров и свойств материалов: $a = 20, b = 50, d = 30, E_a = 1000, E_b = 10000$ и относительной вертикальной деформации $\varepsilon_z = 0,1$. Следует отметить, что значения радиусов даны в условных единицах, так как инвариантными параметрами в решении будут относительные величины радиусов и перемещений (таблица).

Таблица. – Радиальное перемещение внутренней границы полого цилиндра

Коэффициенты Пуассона μ	Перемещение внутренней поверхности цилиндра a (U_a)	
	линейное решение	нелинейное решение
$\mu_a = 0,4; \quad \mu_b = 0,05$	0,738756	0,727242
$\mu_a = 0,05; \quad \mu_b = 0,4$	1,31558	1,2888

Из приведенной таблицы видно, что значения перемещений внутренней поверхности цилиндра в линейном и нелинейном решениях отличаются несущественно. Однако, это необходимо учитывать при использовании данных решений в качестве эталонных.

Для решения подобного типа задач в более широкой постановке, включая многомерные задачи, разработаны расчетные схемы и алгоритмы численного решения таких задач. При этом расчетные схемы и алгоритмы численного решения указанных задач основаны на расчете сил взаимодействия между структурными элементами и последовательных смещениях элементов в направлении действия сил до установления равновесного состояния. Расчеты проводятся по явной схеме. Такой подход позволяет оптимальным способом решать многомерные задачи напряженно-деформированного состояния, используя компьютеры с многоядерными процессорами и приемы распараллеливания расчетных схем. Более подробно принципиальные основы этого подхода изложены в работе [1].

При отработке новых расчетных схем численного моделирования напряженно-деформированного состояния массивов горных пород с вертикальными цилиндрическими выработками необходимо проводить тестирование для оценки точности и сходимости этих схем. С этой целью была проведена серия аналитических и численных расчетов задач деформирования неоднородного (двухслойного) цилиндра для различных модулей упругости (E_a , E_b) и коэффициентов Пуассона (μ_a , μ_b) по описанным методам. Ниже приведены расчетные схемы для численного решения. Внутренний слой имеет характеристики E_a , μ_a ; внешний – E_b , μ_b . Нумерация узлов ведется от внешней границы.

Расчет сил для внутренних узлов наружного цилиндра ($i = \overline{2, N_1 - 1}$):

$$\begin{aligned} Fr1(i) &= -E_b \cdot \frac{(1 - \mu_b)lr1(i) + \mu_b [lh + ls1(i)]}{1 - 2\mu_b^2 - \mu_b} \cdot \frac{r_0(i) + r_0(i-1)}{2}; \\ Fr2(i) &= -E_b \cdot \frac{(1 - \mu_b)lr2(i) + \mu_b [lh + ls2(i)]}{1 - 2\mu_b^2 - \mu_b} \cdot \frac{r_0(i) + r_0(i+1)}{2}; \\ Fs(i) &= -\frac{r_0(i+1) - r_0(i-1)}{2} \cdot E_b \cdot \frac{(1 - \mu_b) \left(1 - \frac{r(i)}{r_0(i)} \right) + \mu_b \left[lh + \frac{ls1(i) + ls2(i)}{2} \right]}{1 - 2\mu_b^2 - \mu_b}, \end{aligned}$$

где $Fr1(i)$, $Fr2(i)$, $Fs(i)$ – составляющие суммарной силы $F(i)$ на узле i : $Fr1(i)$ – справа и $Fr2(i)$ – слева от точки i в радиальном направлении, $Fs(i)$ в точке i за счет деформации в окружном направлении;

$lr1(i)$, $lr2(i)$ – относительные изменения расстояний между точкой i и соседними узлами в радиальном направлении и, соответственно, $ls1(i)$, $ls2(i)$ – в окружном направлении;

lh – заданная относительная деформация цилиндра вдоль его оси.

Расчет сил для внутреннего цилиндра ($i = \overline{N_1 + 1, N - 1}$):

$$\begin{aligned} Fr1(i) &= -E_a \cdot \frac{(1 - \mu_a)lr1(i) + \mu_a [lh + ls1(i)]}{1 - 2\mu_a^2 - \mu_a} \cdot \frac{r_0(i) + r_0(i-1)}{2}; \\ Fr2(i) &= E_a \cdot \frac{(1 - \mu_a)lr2(i) + \mu_a [lh + ls2(i)]}{1 - 2\mu_a^2 - \mu_a} \cdot \frac{r_0(i) + r_0(i-1)}{2}; \\ Fs(i) &= -\frac{r_0(i+1) - r_0(i-1)}{2} \cdot E_a \cdot \frac{(1 - \mu_a) \left(1 - \frac{r(i)}{r_0(i)} \right) + \mu_a \left[lh + \frac{ls1(i) + ls2(i)}{2} \right]}{1 - 2\mu_a^2 - \mu_a}. \end{aligned}$$

Значения $lr1(i)$, $lr2(i)$, $ls1(i)$, $ls2(i)$ и $dr(i)$, соответственно:

для линейной модели	для нелинейной модели
$lr1(i) = -\frac{[r(i) - r(i-1)] - [r_0(i) - r_0(i-1)]}{r_0(i) - r_0(i-1)};$	$lr1(i) = -\frac{[r(i) - r(i-1)] - [r_0(i) - r_0(i-1)]}{r(i) - r(i-1)};$
$lr2(i) = -\frac{[r(i+1) - r(i)] - [r_0(i+1) - r_0(i)]}{r_0(i+1) - r_0(i)};$	$lr2(i) = -\frac{[r(i+1) - r(i)] - [r_0(i+1) - r_0(i)]}{r(i+1) - r(i)};$
$ls1(i) = -\frac{[r(i-1) + r(i)] - [r_0(i-1) + r_0(i)]}{r_0(i-1) + r_0(i)};$	$ls1(i) = -\frac{[r(i-1) + r(i)] - [r_0(i-1) + r_0(i)]}{r(i-1) + r(i)};$
$ls2(i) = -\frac{[r(i+1) + r(i)] - [r_0(i+1) + r_0(i)]}{r_0(i+1) + r_0(i)};$	$ls2(i) = -\frac{[r(i+1) + r(i)] - [r_0(i+1) + r_0(i)]}{r(i+1) + r(i)};$

$$dr(i) = \left[\frac{Fr1(i) + Fr2(i) + Fs(i)}{r_0(i)} \right] dt; \quad r^{j+1}(i) = r^j(i) + dr^j(i),$$

где j – индекс шага на новом временном слое для пересчета положения узлов.

Расчет сил для границы раздела цилиндров ($i = N_1$):

$$Fr1(N_1) = -\frac{E_a + E_b}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right) lr1(N_1) + \frac{\mu_a + \mu_b}{2} [lh + ls1(N_1)]}{1 - 2\left(\frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right)^2 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}} \cdot \frac{r_0(N_1) + r_0(N_1 - 1)}{2};$$

$$Fr2(N_1) = E_b \cdot \frac{\left(1 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right) lr2(N_1) + \frac{\mu_a + \mu_b}{2} [lh + ls2(N_1)]}{1 - 2\left(\frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right)^2 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}} \cdot \frac{r_0(N_1) + r_0(N_1 + 1)}{2};$$

$$Fs(N_1) = -\frac{r_0(N_1 + 1) - r_0(N_1 - 1)}{2} \cdot \frac{E_a + E_b}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right) \left(1 - \frac{r(N_1)}{r_0(N_1)}\right) + \frac{\mu_a + \mu_b}{2} \left[lh + \frac{ls1(N_1) + ls2(N_1)}{2}\right]}{1 - 2\left(\frac{\mu_a + \mu_b}{2}\right)^2 - \frac{\mu_a + \mu_b}{2}}.$$

Значения $lr1(N_1)$, $lr2(N_1)$, $ls1(N_1)$, $ls2(N_1)$ и $dr(N_1)$ равны, соответственно:

для линейной модели

для нелинейной модели

$$lr1(N_1) = -\frac{[r(N_1) - r(N_1 - 1)] - [r_0(N_1) - r_0(N_1 - 1)]}{r_0(N_1) - r_0(N_1 - 1)}; \quad lr1(N_1) = -\frac{[r(N_1) - r(N_1 - 1)] - [r_0(N_1) - r_0(N_1 - 1)]}{r(N_1) - r(N_1 - 1)};$$

$$lr2(N_1) = -\frac{[r(N_1 + 1) - r(N_1)] - [r_0(N_1 + 1) - r_0(N_1)]}{r_0(N_1 + 1) - r_0(N_1)}; \quad lr2(N_1) = -\frac{[r(N_1 + 1) - r(N_1)] - [r_0(N_1 + 1) - r_0(N_1)]}{r(N_1 + 1) - r(N_1)};$$

$$ls1(N_1) = -\frac{[r(N_1 - 1) + r(N_1)] - [r_0(N_1 - 1) + r_0(N_1)]}{r_0(N_1 - 1) + r_0(N_1)}; \quad ls1(N_1) = -\frac{[r(N_1 - 1) + r(N_1)] - [r_0(N_1 - 1) + r_0(N_1)]}{r(N_1 - 1) + r(N_1)};$$

$$ls2(N_1) = -\frac{[r(N_1 + 1) + r(N_1)] - [r_0(N_1 + 1) + r_0(N_1)]}{r_0(N_1 + 1) + r_0(N_1)}; \quad ls2(N_1) = -\frac{[r(N_1 + 1) + r(N_1)] - [r_0(N_1 + 1) + r_0(N_1)]}{r(N_1 + 1) + r(N_1)};$$

$$dr(N_1) = \left[\frac{Fr1(N_1) + Fr2(N_1) + Fs(N_1)}{r_0(N_1)} \right] dt; \quad r^{j+1}(N_1) = r^j(N_1) + dr^j(N_1).$$

Расчет сил для внутренней границы цилиндра ($i = N$):

$$Fr1(N) = -E_a \cdot \frac{(1 - \mu_a) lr1(N) + \mu_a [lh + ls1(N)]}{1 - 2\mu_a^2 - \mu_a} \cdot \frac{r_0(N) + r_0(N - 1)}{2};$$

$$Fs(N) = -\frac{r_0(N) - r_0(N - 1)}{2} \cdot E_a \cdot \frac{(1 - \mu_a) \left(1 - \frac{r(N)}{r_0(N)}\right) + \mu_a [lh + lr1(N)]}{1 - 2\mu_a^2 - \mu_a}.$$

Значения $lr1(N)$, $ls1(N)$ и $dr(N)$ равны, соответственно:

$$\begin{aligned}
 &\text{для линейной модели} && \text{для нелинейной модели} \\
 lr1(N) = -\frac{[r(N)-r(N-1)]-[r_0(N)-r_0(N-1)]}{r_0(N)-r_0(N-1)}; &&& lr1(N) = -\frac{[r(N)-r(N-1)]-[r_0(N)-r_0(N-1)]}{r(N)-r(N-1)}; \\
 ls1(N) = -\frac{[r(N-1)+r(N)]-[r_0(N-1)+r_0(N)]}{r_0(N-1)+r_0(N)}; &&& ls1(N) = -\frac{[r(N-1)+r(N)]-[r_0(N-1)+r_0(N)]}{r(N-1)+r(N)}; \\
 dr(N) = \left[\frac{Fr1(N) + Fs(N)}{r_0(N)} \right] dt; &&& r^{j+1}(N) = r^j(N) + dr^j(N).
 \end{aligned}$$

С помощью приведенных расчетных схем проведены расчеты деформации двухслойного полого цилиндра с различными деформационными характеристиками для сравнения с соответствующими аналитическими решениями. В качестве примера на рисунке 3 приведен результат расчетов деформации двухслойного полого цилиндра при значении свойств материалов: $\mu_a = 0,05$; $E_a = 1000$; $\mu_b = 0,4$; $E_b = 10000$ и относительной вертикальной деформации $\varepsilon_z = 0,1$. На рисунке 4 более детально показаны значения перемещений узлов в радиальном направлении для внутреннего цилиндра. Из приведенных результатов видно, что имеется отличие полученных расчетных значений для линейной и нелинейной моделей. Однако при этом аналитические и численные расчеты для каждой модели практически совпадают.

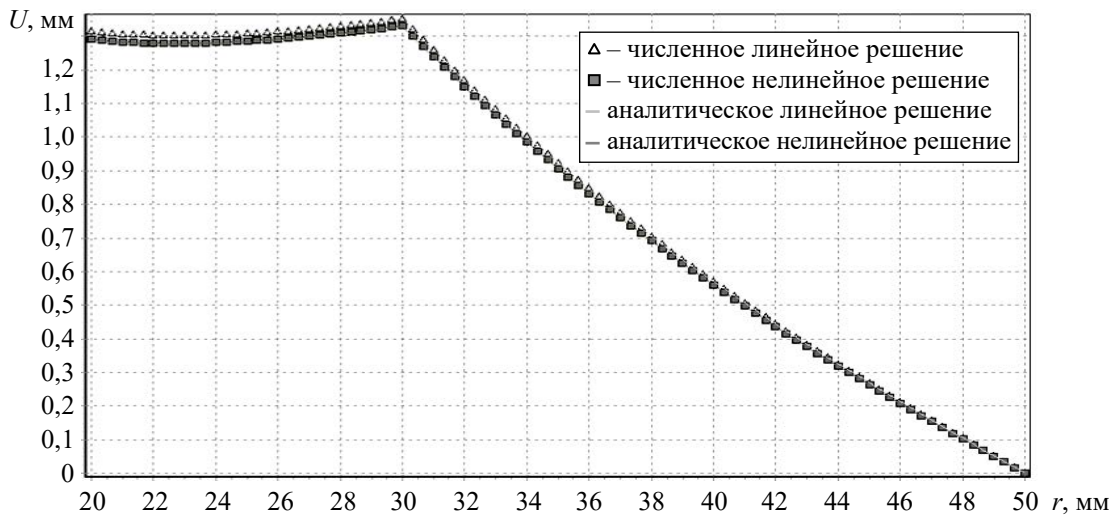


Рисунок 3. – Радиальные перемещения в двухслойном полом цилиндре при $\mu_a = 0,05$; $E_a = 1000$; $\mu_b = 0,4$; $E_b = 10000$ и $\varepsilon_z = 0,1$

Таким образом, показана особенность аналитических и численных решений задач напряженно-деформированного состояния неоднородных осесимметричных объектов в классической и нелинейной постановке. Решения таких задач можно использовать при оценке напряженно-деформированного состояния в замороженных массивах горных пород с вертикальными горными выработками при разработке проектов проходки шахтных стволов с применением искусственного замораживания, а также при лабораторном моделировании таких объектов.

Закключение. Полученные аналитические решения осесимметричной задачи деформации неоднородного полого неограниченного цилиндра с неподвижной внешней боковой границей позволяют тестировать разработанные численные алгоритмы для расчета типовых задач напряженно-деформированного состояния в их классической и

нелинейной постановках. При этом необходимо соблюдать соответствие исходных постановок задач. Разработанные аналитические и численные решения могут быть использованы при разработке проектов проходки шахтных стволов с применением искусственного замораживания и лабораторного моделирования таких объектов.

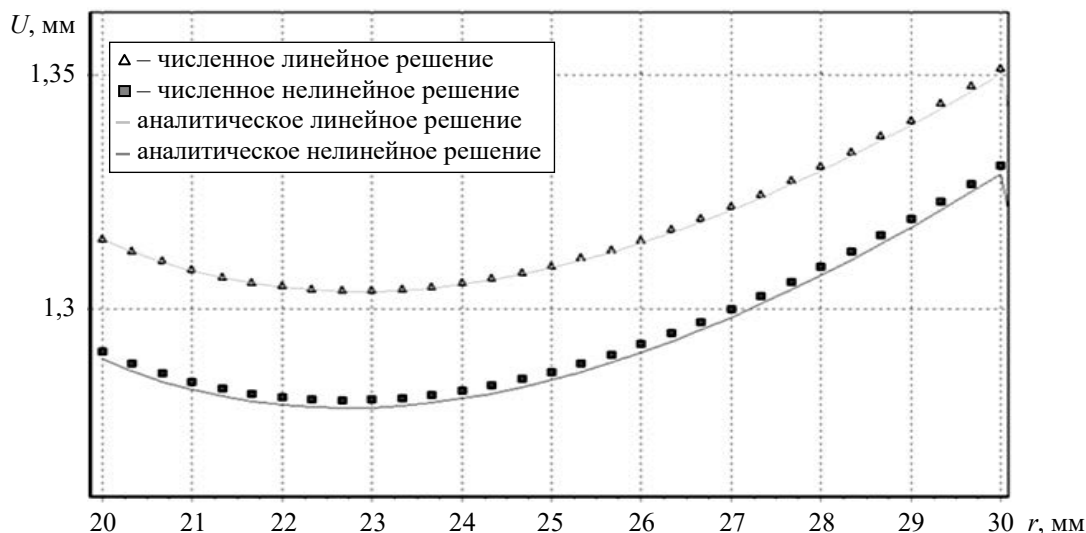


Рисунок 4. – Радиальные перемещения узлов для внутреннего цилиндра

Список использованных источников

1. Бровка, Г.П. Моделирование НДС однородного полого цилиндра с неподвижной внешней боковой границей при осесимметричной нагрузке / Г.П. Бровка, К.В. Пяткевич, Н.Н. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 58-70.
2. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко. – Л.: ОНТИ, 1937. – 451 с.
3. Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела: в 3 т. / А.П. Филин – М.: Наука, 1976-1981. – Т. I: Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. – 1976. – 832 с.

Информация об авторах

Геннадий Петрович Бровка – доктор технических наук, заведующий лабораторией физико-химической механики природных дисперсных систем, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь), e-mail: brovka_gp@rambler.ru.

Николай Николаевич Шилович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий, Белорусский государственный экономический университет (пр. Партизанский, 26, 220070, г. Минск, Беларусь), e-mail: shilnn@tut.by.

Information about the authors

Gennady Petrovich Brovka – D. Sc. in engineering, Head of the Laboratory of Physicochemical Mechanics of Natural Dispersed Systems, Nature Management Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skaryna Str., 220076, Minsk, Belarus), e-mail: brovka_gp@rambler.ru.

Nikolay Nikolayevich Shilovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Information Technology Department, Belarus State Economic University (26, Partizanski Ave., 220070, Minsk, Belarus), e-mail: shilnn@tut.by.

Поступила в редакцию 26.05.2021 г.

УДК 625.089.23

Д.М. Гуцев¹, А.З. Скороход², В.Л. Моисеенко²

¹ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси»,
г. Гомель, Беларусь

²УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ МЕХАНИЗАЦИИ ПУТЕВЫХ РАБОТ

Аннотация. В статье производится расчет и разработка элементов и механизмов, призванных частично механизировать работы, связанные с обслуживанием железнодорожных путей и повышением безопасности персонала. Разработанное устройство подъема лыж предназначено для перевозки и распределения рельсов при ремонтных, монтажных и демонтажных работах железнодорожных путей. Устройство монтируется на стандартной универсальной железнодорожной платформе типа 13-401 либо аналогичной.

Ключевые слова: текущее содержание пути, механизация работ, обслуживание железнодорожного пути, платформа, рельс, пневмопривод, моделирование.

D.M. Gutsev¹, A.Z. Skorohod², V.L. Moiseenko²

¹The State Scientific Institution “V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute
of National Academy of Sciences of Belarus” Gomel, Belarus

²Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

DEVELOPMENT OF TECHNICAL DOCUMENTATION OF THE DEVICE FOR TRACKWORK MECHANIZATION

Abstract. The article calculates and develops elements and mechanisms designed to partially mechanize operations related to track maintenance and enhancing the safety of personnel. The developed lifting device of ski is intended for transportation and partition of rails during repair, assembly and dismantling works of railway tracks. The device is mounted on a standard multi-operated railway platform of the 13-401 type or similar.

Keywords: routine track maintenance, mechanization of operations, track maintenance, platform, rail, pneumatic drive, modeling.

Введение. Текущее содержание пути (т.с.п.) – комплекс организационно-технических мер, обеспечивающих исправное состояние железнодорожного пути: осмотры, контроль за состоянием элементов верхнего строения пути, искусственных сооружений и земляного полотна и выполнение путевых работ [1]. Основной задачей т.с.п. является содержание его в пределах норм и допусков, установленных действующими «Правилами технической эксплуатации железной дороги» и «Инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути» в соответствии с чертежами сооружений. Цель т.с.п. – предупреждение неисправностей, продление сроков службы элементов пути и поддержание его в чистом и работоспособном состоянии.

Развитие механизации ремонтных работ идет в направлении оснащения сооружений энергетическими мощностями: стационарными воздушными компрессорами; применение передвижных ремонтных мастерских, обеспеченных необходимым оборудованием и механизированным инструментом; использование специализированных машин в составе ремонтных поездов.

Прибывшие с завода (или от рельсосварочного поезда) на обычном подвижном составе (на платформах или полувагонах) рельсы перегружают на укладочный поезд с расчетом последующего вывоза их на участок смены. Обычно для рельсоукладочного поезда используются платформы, оборудованные роликовым транспортером (из состава путеукладочных поездов). Для возможности продольной транспортировки рельсов по составу и подачи их на путеукладочный кран их грузят на шпалы, которые в свою очередь уложены на «лыжи», предназначенные для протяжки пакетов. Усовершенствования в области инструментов, механического оборудования и материалов так сильно повлияли на производительность и экономику этого вида работ, что в настоящее время более чем когда-либо уделяется внимание получению экономического эффекта от этих усовершенствований. Большое внимание уделяется также организации рабочих бригад и обучению работников технике и методам безопасности при смене рельсов [2].

Основная часть. Работы, связанные с обслуживанием железнодорожных путей, сопряжены с необходимостью перемещения элементов железнодорожного полотна, что является источником повышенной опасности. В процессе проектирования произведены расчеты, разработаны элементы и механизмы, позволяющие частично механизировать указанные выше работы, с одной стороны, и повысить безопасность работников, с другой. Разработанное устройство «подъема лыж» предназначено для перевозки и распределения рельсов при ремонтных, монтажных и демонтажных работах железнодорожных путей. Разработанное устройство монтируется на стандартной универсальной железнодорожной платформе типа 13-401 либо аналогичной, предназначенной для перевозки сельскохозяйственной и специальной техники на колесном и гусеничном ходу, негабаритной дорожно-строительной техники, различных металлических конструкций и других грузов, не нуждающихся в защите от неблагоприятных атмосферных условий. При этом с платформы демонтируются стандартные продольные и торцевые борта, как показано на рисунке 1.

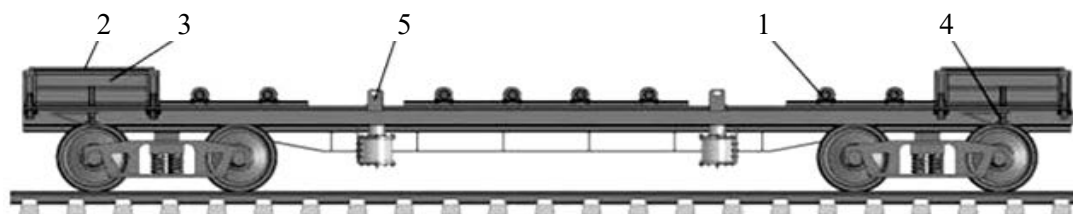


Рисунок 1. – Общий вид разработанного устройства

На платформе установлены в два ряда устройства для продольного перемещения рельсов вдоль платформы – рольганги 1. Конструктивно рольганги представляют собой сварную раму с закрепленными на ней в подшипниковых узлах металлическими роликами с бортами, на которые укладывают перемещаемые рельсы.

Операции, связанные с погрузкой (и перемещением) рельсов, характеризуются особыми условиями работы для персонала, нередко сопряженными со значительными опасностями и рисками, приводящими к травматизму и даже смерти. Одной из таких опасностей является падение с большой высоты.

Для обеспечения безопасности при выполнении работ данного вида был разработан вариант устройства стационарного типа, предотвращающего падение персонала с железнодорожных платформ на пути или железнодорожную насыпь в случаях нештатных ситуаций. Для предотвращения защемлений и получения травм персоналом в случае нештатных ситуаций при попадании в зазор между железнодорожной платформой и устройством над колесными парами с двух сторон монтируются ограждения 3 с решетками 2.

Ограждение (рисунок 2) представляет собой откидывающийся борт с возможностью промежуточной фиксации в горизонтальном положении посредством установки упора 4.

Подвижность площадок обеспечивается петлями. При работе площадки опускаются на рабочую поверхность железнодорожных платформ, тем самым увеличивая для персонала площадь рабочей зоны и ликвидируя зазор между ней и устройством.

Удержание площадок в нерабочем вертикальном состоянии осуществляется за счет поворотных фиксаторов и осей, как показано на рисунке 3, закрепленных на стойках при помощи сварки.

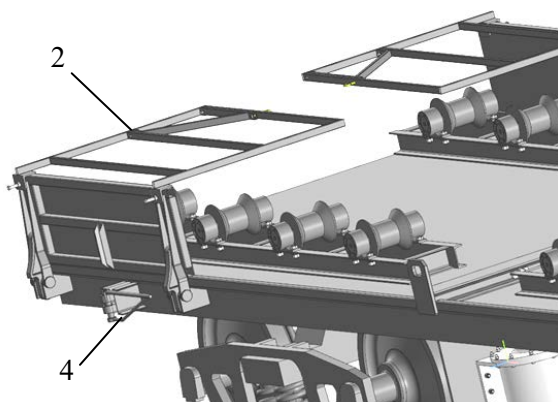
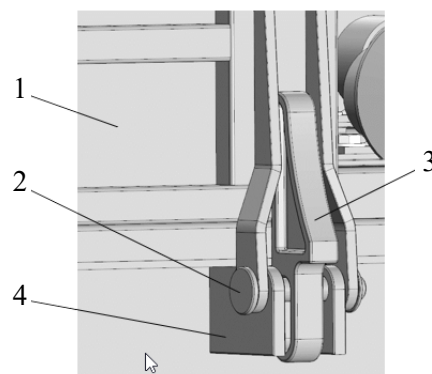


Рисунок 2. – Устройство ограждения



1 – откидная площадка; 2 – ось;
3 – поворотный фиксатор; 4 – петля
Рисунок 3. – Механизм откидных площадок

Установка перемещаемых рельсов вдоль платформы на рольганг либо кантование поперек платформы осуществляется посредством балок 5 (рисунок 1). Балки в количестве двух штук устанавливаются на платформе между закрепленными рольгангами таким образом, чтобы делить платформу приблизительно на три равные части. Каждая балка шарнирно крепится к двум тормозным цилиндрам типа 188Б, объединенным в одну пневматическую систему. Тормозные цилиндры, в данном случае играющие роль подъемных механизмов, расположены вертикально и закреплены на силовой раме железнодорожной платформы.

Использование тормозных цилиндров обусловлено тем, что большинство современных путевых машин оснащается пневматическим приводом. Наряду с тормозными системами пневматический привод используется как вторичный для основного рабочего оборудования (плуговые снегоочистители, хоппер-дозаторы) и для вспомогательных систем (устройства перемещения и прижима тележек контрольно-измерительных систем, натяжение тросов, привод стопорных устройств и др.). Подача воздуха в пневмосистему может осуществляться от компрессора локомотива, тягового модуля или от компрессора, установленного на самой машине. Пневматический привод обеспечивает высокое быстродействие, амортизацию динамических нагрузок на рабочий орган вследствие упругости воздуха. Пневматические устройства более простые по сравнению с гидравлическими и другими устройствами, отработанный воздух выпускается сразу в атмосферу. Пневмопривод позволяет формировать хозяйственные поезда из путевых машин с общей компрессорной установкой на локомотиве.

Вместе с тем, в пневмосистемах путевых машин давление воздуха находится в пределах 0,4-0,7 МПа, поэтому приводные цилиндры силовых рабочих органов имеют повышенные габаритные размеры. Пневмопривод не позволяет без применения дополнительных стопорных устройств зафиксировать исполнительный орган в промежуточных положениях. Зачастую наблюдается прерывистость хода штока, для компенсации которого в балках 5 (рисунок 1) предусмотрены крепежные отверстия с припуском, по-

звояющим компенсировать возможную неравномерность движения штока пневмоцилиндра. Пневматическая трансмиссия имеет низкий КПД, поэтому применяется в основном в системах, не требующих частых переключений механизмов. При неправильной эксплуатации имеется опасность взрыва резервуаров.

Технические характеристики механизма подъема лыж представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные технические характеристики разработанного устройства

Наименование показателей	Характеристика/значение
Степень мобильности устройства	мобильное
Тип привода	пневматический
Максимальное давление в системе, МПа	0,6
Высота подъема, мм	240
Максимальный вес подъема, т	24,34
Тип используемого покрытия	лакокрасочное

Расчеты, подтверждающие работоспособность выбранной конструкции.

Подбор диаметров болтовых соединений и проверку используемых тормозных цилиндров производили при помощи расчетов и путем трехмерного твердотельного моделирования. Расчет пневмоцилиндра выполняли в соответствии с [3].

Расчет пневмоцилиндра.

Исходные данные: максимальная нагрузка платформы 40 шт. рельсов Р-50 массой 50 кг на погонный метр, длиной 12 м. Рабочее давление сжатого воздуха в пневмосистеме 0,6 МПа. Максимальный ход поршня – 240 мм.

Исходя из количества пневмоцилиндров (4) в системе, сила тяжести груза $F_{1\Sigma}$, приходящаяся на шток одного пневмоцилиндра:

$$F_{1\Sigma} = (F_p + 2 \cdot F_{tb}) / 4 = 5,967 \times 10^4 \text{ Н}, \quad (1)$$

где F_p – сила тяжести рельсов, $F_p = 2,354 \times 10^5 \text{ Н}$;

F_{tb} – сила тяжести балки, $F_{tb} = 1,667 \times 10^3 \text{ Н}$.

Сила тяжести F_Σ , приходящаяся на 4 пневмоцилиндра: $F_\Sigma = 5,967 \times 10^4 \text{ Н} \times 4 = 23,87 \times 10^4 \text{ Н}$.

Определяем требуемый диаметр поршня пневмоцилиндра D_p :

$$D_p = \sqrt{F / (0,785 \cdot P_p \cdot \eta_\Sigma)}, \quad (2)$$

где P_p – рабочее давление сжатого воздуха в пневмосистеме, $P_p = 0,60 \text{ МПа}$;

η_Σ – суммарный коэффициент полезного действия пневмоцилиндра, $\eta_\Sigma = 0,95$.

$D_p = 365,2 \text{ мм}$. По ГОСТ 15608-81 принимаем $D_{pr} = 360,0 \text{ мм}$, диаметр штока соответственно $d_{st} = 80 \text{ мм}$.

Условие прочности проверяем по стандарту DIN 3320, по которому условие прочности удовлетворяет внешним условиям при

$$S_{st} / S_{pr} = 0,6 \div 0,8, \quad (3)$$

где S_{st} – площадь штоковой области пневмоцилиндра;

S_{pr} – площадь поршня пневмоцилиндра.

$$S_{st} = \pi(D_{pr} - d_{st})^2 / 4 = 0,062 \text{ м}^2;$$

$$S_{pr} = \pi D_{pr}^2 / 4 = 0,102 \text{ м}^2;$$

$$S_{st} / S_{pr} = 0,6.$$

Следовательно, условие прочности выполняется, и диаметры поршня и штока выбраны правильно.

Определяем время T_p срабатывания пневмоцилиндра:

$$T_p = D_{pr}^2 \cdot L_{st} / (d_0^2 \cdot v_{air}) = 35 \text{ с}, \quad (4)$$

где L_{st} – длина штока, $L_{st} = 490$ мм;

d_0 – диаметр подводящего трубопровода, $d_0 = 10$ мм;

v_{air} – скорость воздуха в трубопроводе при заданном давлении 0,6 МПа, $v_{air} = 18$ м/с.

Проверяем толщину стенки пневмоцилиндра, для этого определим необходимую толщину δ_{st} :

$$\delta_{st} = P_p \cdot D_{pr} / (2 \cdot \sigma_p) = 2,16 \text{ мм}, \quad (5)$$

где σ_p – предел прочности материала стенки пневмоцилиндра при растяжении, $\sigma_p = 50$ Н/мм².

Из условия жесткости конструкции пневмоцилиндра, принимаем толщину стенки, равную 10 мм.

Давление P_{st} в штоковой полости составляет 0,2 ... 0,6 P_p :

$$P_{st} = 0,4 \cdot P_p = 0,24 \text{ МПа}. \quad (6)$$

Определяем усилие F_{us} , которое развивает гидроцилиндр принятых размеров:

$$F_{us} = (P_p \cdot S_{pr} - P_{st} \cdot S_{st}) \cdot \eta_{\Sigma} = 4,398 \times 10^4 \text{ Н}. \quad (7)$$

Четыре пневмоцилиндра развивают усилие $F_{4\Sigma}$:

$$F_{4\Sigma} = 4 \cdot F_{us} = 1,759 \times 10^5 \text{ Н}.$$

Отношение $F_{4\Sigma}/F_{\Sigma} = (1,759 \times 10^5) / (23,87 \times 10^4) = 0,7$. Следовательно, максимальная нагрузка на платформу превышает максимальную подъемную силу четырех гидроцилиндров. Проведем уточняющий расчет. В качестве максимальной загрузки платформы выберем 20 шт. рельсов Р-50. Тогда $F_{\Sigma 20}$ будет равно $1,21 \cdot 10^5$ Н. Отношение $F_{4\Sigma}/F_{\Sigma 20} = (1,759 \times 10^5) / (1,21 \cdot 10^5) = 1,5$. Условие выполняется. Таким образом, нагрузка на 4 пневмоцилиндра одномоментно не должна превышать в эквиваленте 20-25 рельсов Р-50. При нагрузке в 25 рельсов отношение $F_{4\Sigma}/F_{\Sigma 25} = (1,759 \times 10^5) / (1,504 \cdot 10^5) = 1,2$.

Проверка штока пневмоцилиндра на устойчивость.

Момент инерции круга J_{krq} диаметром d :

$$J_{krq} = \pi \cdot d_{st}^4 / 64 = 2,011 \times 10^{-6} \text{ м}^4. \quad (8)$$

Приведенная длина штока $L_{pr} = 1,5 \cdot L_{st}$; $L_{pr} = 0,735$ м.

Модуль Юнга для стали – $E = 2,1 \times 10^{11}$ Па.

Определяем критическую силу по формуле:

$$F_{kr} = \pi \cdot E \cdot J_{krq} / L_{pr}^2 = 3,14 \cdot (2,1 \times 10^{11}) \cdot (2,011 \times 10^{-6}) / 0,735^2 = 24,55 \times 10^5 \text{ Н}. \quad (9)$$

Поскольку $F_{kr} \gg F_{\Sigma 20}/4$ ($24,55 \times 10^5$ Н $\gg$ 30254 Н), а также $F_{kr} \gg F_{\Sigma 25}/4$ ($24,55 \times 10^5$ Н $\gg$ 37609 Н), следовательно, устойчивость штока обеспечена.

Расчет болтовых соединений на срез.

В соответствии с ГОСТ 7798-70 выбираем болты класса точности 8.8, следовательно, предел прочности для такого класса болтов – 800 МПа, предел текучести – 640 МПа, твердость по Бринеллю – 238...304.

Сила тяжести груза (от 25 рельсов), приходящаяся на четыре штока пневмоцилиндров, была рассчитана ранее и равна $F_{\Sigma 25} = 150,4$ кН.

Определим предел прочности на срез:

$$[\tau_{\text{ср}}] = (0,2 \div 0,3) \cdot \sigma_T, \quad (10)$$

где σ_T – предел текучести, $\sigma_T = 640$ МПа.

Тогда

$$\tau_{\text{ср}} = 0,2 \cdot \sigma_T = 128 \text{ МПа.}$$

Расчет болтов на срез проводим по формуле:

$$(\pi \cdot d_b^2 / 4) \cdot \tau_{\text{ср}} > F_{\Sigma 25}, \quad (11)$$

где d_b – диаметр болта, $d_b = 16$ мм.

При количестве болтов $N_b = 24$ прочность на срез всех болтов:

$$PR_{\text{ср}} = (\pi \cdot d_b^2 \cdot N_b / 4) \cdot \tau_{\text{ср}} = 618 \text{ кН.}$$

Условие $PR_{\text{ср}} > F_{\Sigma 25}$ выполняется ($618 \text{ кН} > 150,4 \text{ кН}$), следовательно, примененное количество болтов для соединения пневмоцилиндров к силовой раме платформы достаточно.

Расчет подъемной балки.

Оценка работоспособности балки для подъема лыж, которые перемещают пакет рельсов, уложенных на платформу, осуществлялась путем создания твердотельной модели в пакете ARM FEM для КОМПАС-3D v18.1 (ООО НТЦ «АИМ») с последующим проведением анализа напряжений. Система прочностного конечно-элементного анализа ARM FEM интегрирована в систему трехмерного моделирования КОМПАС-3D. В настоящее время инструменты ARM FEM являются составной частью единой среды проектирования и анализа, обеспечивающей ассоциативную связь с геометрической моделью, единую библиотеку материалов и общий с КОМПАС-3D интерфейс. Что являлось актуальным, так как проектирование устройства для подъема лыж осуществлялось именно в данной среде.

Расчет производили с целью определения надежности работы балки (рисунок 4) под действием нагрузки, создаваемой пакетом рельсов (максимальной загрузки).



Рисунок 4. – Внешний вид рассчитываемой балки без проушин

В ходе анализа определяли максимальные напряжения, перемещения и коэффициент запаса прочности. Принятые граничные условия: равномерное распределенное давление на поверхности трехмерной модели; давление действует по нормали к поверхности; в качестве конечных элементов служат тетраэдры. Генерацию КЭ-сетки осуществляли в автоматическом режиме с использованием таких параметров, как максимальная длина стороны элемента, максимальный коэффициент сгущения на поверхности и коэффициент разрежения в объеме. Результаты анализа представлены на рисунках 5-8. Инерционные характеристики модели представлены в таблице 2.

По результатам анализа установлено, что наибольшие напряжения по Мизесу (рисунок 5) распределены в средней части балки и не превышают 125,4 МПа, коэффициент запаса прочности (рисунок 8) $S_{\text{зп}} = 3,3$, прочность обеспечивается. Максимальные перемещения (рисунок 6) в местах воздействия нагрузки в единичный момент времени не превышают 2,89 мм.

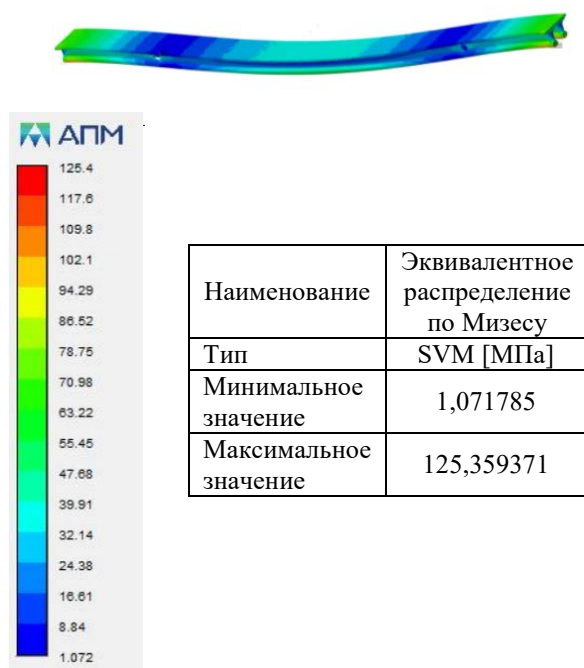


Рисунок 5. – Эквивалентное распределение по Мизесу

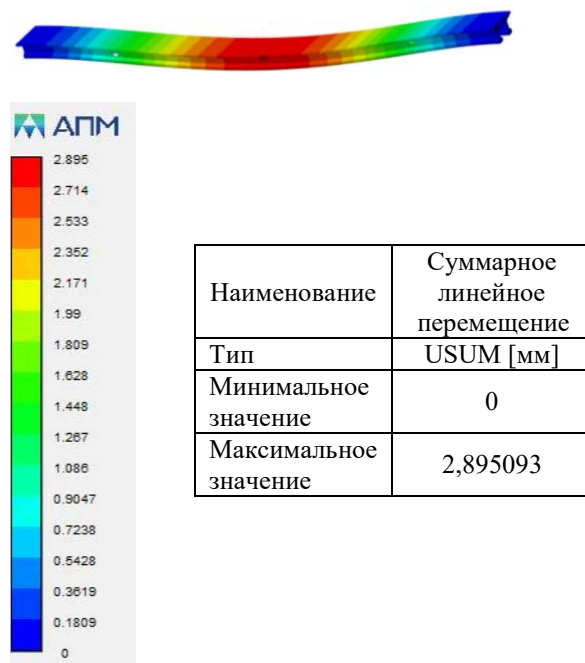


Рисунок 6. – Суммарное линейное перемещение

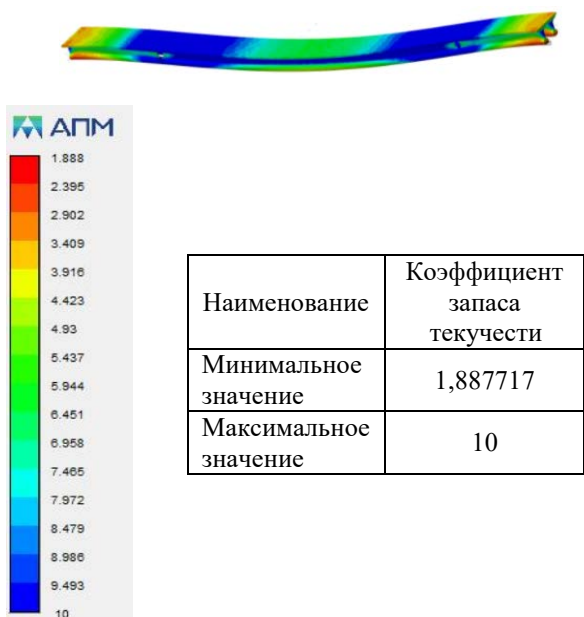


Рисунок 7. – Коэффициент запаса текучести

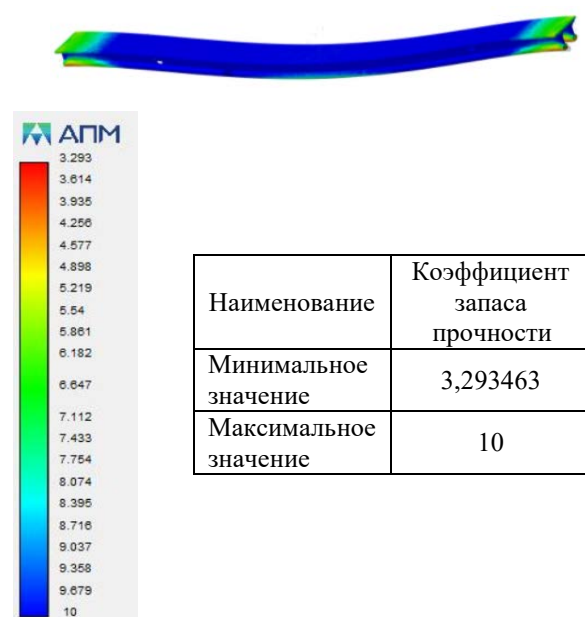


Рисунок 8. – Коэффициент запаса прочности

Заключение. Таким образом, разработанное устройство для «подъема лыж» обеспечивает безопасное выполнение работ, связанных с обслуживанием железнодорожных путей при перемещении элементов железнодорожного полотна. Расчеты подтверждают надежность и безопасность работы балки под действием максимальной загрузки, создаваемой пакетом из 20-25 рельсов, а также надежность болтовых соединений пневмоцилиндров к силовой раме платформы. В процессе разработки было уделено внимание вопросам унификации и стандартизации.

Данная работа была произведена в рамках договора № 14728/672 РПЮ от 04.05.2021 г.

Таблица 2. – Инерционные характеристики модели

Наименование	Значение
Масса модели, кг	148,903324
Центр тяжести модели, м	(–0,044999; 1,440001; 0,028351)
Моменты инерции модели относительно центра масс, кг·м ²	(103,058531; 0,557104; 103,258096)
Реактивный момент относительно центра масс, Н·м	(0,025454; –0,023394; 0)
Суммарная реакция опор, Н	(–0; –0,000001; –29499,999043)
Абсолютное значение реакции, Н	73549,999216
Абсолютное значение момента, Н·м	0,086191

Список использованных источников

1. Железнодорожный транспорт: энциклопедия / Гл. ред. Н.С. Конарев. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. – 559 с.
2. Общий курс железных дорог: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.И. Ефименко [и др.]; под ред. Ю.И. Ефименко. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 256 с.
3. Теория и проектирование гидропневмоприводов: практикум: пособие для студентов специальности 1-36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин» / сост.: П.Н. Кишкевич, М.И. Жилевич, П.Р. Бартош. – Минск: БНТУ, 2020. – 110 с.

Информация об авторах

Дмитрий Михайлович Гуцев – кандидат технических наук, заведующий сектором «Специальные смазочные материалы» отдела № 4 «Трение, смазка и эксплуатационная стойкость материалов», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: gucevd@mail.ru.

Александр Зосимович Скороход – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: odinodin@list.ru.

Владимир Леонидович Моисеенко – 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.

Information about the authors

Dmitry Mikhailovich Gutsev – Ph. D. in Engineering sciences, Head of “Special Lubricants” Sector of the Department No. 4 “Friction, lubricant and service durability of materials”, The State Scientific Institution “V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus” (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: gucevd@mail.ru.

Alexandr Zosimovich Skorohod – Ph. D. in Engineering sciences, Associate Professor of the “Transport and technological machines and equipment” Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: odinodin@list.ru.

Vladimir Leonidovich Moiseenko – Ph. D. in Engineering sciences, Associate Professor of the “Transport and technological machines and equipment” Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: odinodin@list.ru.

Поступила в редакцию 24.06.2021 г.

УДК 622.7.067.047.012.011

Б.А. Вишняк, Т.В. Сереброва*Группа компаний КАНЕКС, г. Москва, Россия***АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСОМ
ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ И СУШКИ КОНЦЕНТРАТА
СИЛЬВИНИТОВОЙ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ**

Аннотация. В технологических схемах обогащения руд при производстве минеральных удобрений, в частности, в калийной промышленности, важнейшими переделами, определяющими эффективность использования топливно-энергетических ресурсов и качество выпускаемой продукции, являются заключительные операции фильтрования и сушки концентрата. В условиях действующих производств основным направлением, обеспечивающим решение поставленных задач, является создание и внедрение комплексных автоматизированных систем управления технологическими процессами на базе математических моделей с использованием современных программных продуктов, средств контроля и управления.

Ключевые слова: процессы фильтрования и сушки, автоматизированное управление, фильтровально-сушильный комплекс, вакуум-фильтр, барабанная сушилка, моделирование, постановка и решение задач, критерий управления, оптимизация процессов.

B.A. Vishnyak, T.V. Serebrova*KANEX Group of Companies, Moscow, Russia***AUTOMATED CONTROL OF THE COMPLEX OF PROCESSES
OF CONCENTRATE FILTERING AND DRYING OF THE SILVINITE
CONCENTRATION PLANT**

Abstract. In the technological schemes of ore concentration in the production of mineral fertilizers, in particular, in the potash industry, the most important repartitions that determine the efficiency of the use of fuel and energy resources and the quality of the output product are the final filtering and drying operations of the concentrate. In the conditions of existing industry, the main direction that providing the solution of problems is the creation and implementation of the integrated Process Automation Systems based on mathematical models using modern software products, control and management facilities.

Keywords: filtering and drying processes, automated control, filter and drying complex, vacuum filter, drum drier, modeling, problem statement and solving, control criterion, process optimization.

Введение. Разработка и внедрение усовершенствованных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) является основной тенденцией развития современного промышленного производства. Применение теории идентификации и последних достижений теории управления, вероятностных методов и методов адаптивного управления, широкое привлечение средств вычислительной техники дают надежную гарантию существенного повышения эффективности функционирования технологических объектов. В данной работе объектом исследования являются процессы фильтрования и сушки калийного концентрата, являющиеся важным заключительным этапом в цепи технологического обогащения сильвинитовых руд, определяющим топливно-энергетическую эффективность и основные показатели качества готового продукта – влажность и слеживаемость концентрата [1, 2].

При разработке АСУТП наибольшее значение приобретает создание систем, которые могли бы воедино связывать эти процессы и управлять всем комплексом процессов в целом. В действительности, несмотря на многочисленные примеры успешного применения современных методов теории управления для оптимизации технологических процессов, вопросам построения математических моделей, разработки алгоритмов управления комплексом процессов в целом уделяется недостаточно внимания. Анализ существующих решений по автоматизации и управлению технологическими процессами фильтрования и сушки показал, что современный этап управления процессами обезвоживания концентрата в условиях сильвинитовой обогатительной фабрики (СОФ) характеризуется, как правило, системами автоматического контроля и регулирования каждого процесса в отдельности [3, 4].

Фильтровально-сушильный комплекс СОФ включает в себя последовательное соединение ряда параллельно работающих групп аппаратов: вакуум-фильтров и барабанных сушилок. При этом задача управления состоит не только в том, чтобы установить наиболее эффективный режим работы каждого аппарата в отдельности, но и в том, чтобы обеспечить оптимальную работу всего фильтровально-сушильного комплекса. Данная статья посвящена актуальной для горно-химической промышленности теме, связанной с повышением эффективности управления технологическими процессами за счет экономичного и рационального использования топливно-энергетических и сырьевых ресурсов, улучшения качества выпускаемой продукции.

Основная часть. Фильтрование и сушка концентрата являются важнейшими переделами из процессов обогащения руд, которые определяют экономное рациональное использование топлива, энергетических и сырьевых ресурсов при получении готового продукта.

Основной целью работы является исследование технологических процессов фильтрования и сушки СОФ и разработка алгоритмов для создания автоматизированной системы управления (АСУ) фильтровально-сушильным комплексом (ФСК), обеспечивающей экономию топлива, электроэнергии и повышение качества продукта [5, 6].

Поставленная цель определила решение следующих основных задач:

- выбор общего критерия эффективности и постановка задач управления комплексом;
- разработка математических моделей процессов фильтрования, сушки и комплекса в целом;
- разработка критериев и задач управления технологическими процессами ФСК с учетом взаимосвязей между ними;
- выбор методов и решение задач оптимального управления;
- разработка на основе решения этих задач алгоритмов и способов управления технологическими процессами, выбор структуры системы автоматизированного управления СФК.

Применительно к СОФ процессы фильтрования и сушки исследованы как единый объект управления. Это позволило на основе статистически разработанных моделей и алгоритмов, учитывающих специфику калийного производства, создать иерархическую АСУ ФСК, предусматривающую статическую оптимизацию его технологического режима.

По результатам исследований и разработок получено следующее:

- применительно к СОФ получены основные взаимосвязи между определяющими переменными процессов фильтрования и сушки, учитывающие специфические особенности технологии получения калийного концентрата, существенно влияющие на технико-экономические показатели всего ФСК;

- для процессов фильтрации и сушки калийного концентрата разработаны критерии управления, отличающиеся простотой, четким физическим смыслом, и в то же время адекватно отражающие суммарные затраты комплекса в целом;

- приведены постановка и решение задач оптимального управления процессами фильтрации и сушки концентрата в условиях СОФ с учетом взаимосвязи между ними, учитывающие распределение потоков питания между параллельно работающими аппаратами ФСК по их характеристикам в соответствии с производительностью предшествующих переделов и требуемым качеством готового концентрата;

- разработан общий (комплексный) алгоритм управления СФК, включающий алгоритмы оптимального управления процессами фильтрации и сушки, а также согласования нагрузок и ввода водорастворимых антислеживающих добавок в высушенный концентрат;

- разработана структура системы автоматизированного управления ФСК с использованием предложенных алгоритмов;

- разработан способ управления параллельно работающими сушильными аппаратами путем определения отношения количества испаренной влаги к расходу топлива для каждой сушилки, сравнения их между собой и распределения исходного материала в зависимости от величины этого отношения, обеспечивающей повышение экономичности расхода топлива (авторское свидетельство № 1099200) [7].

Из представленной на рисунке 1 зависимости суммарных приведенных затрат

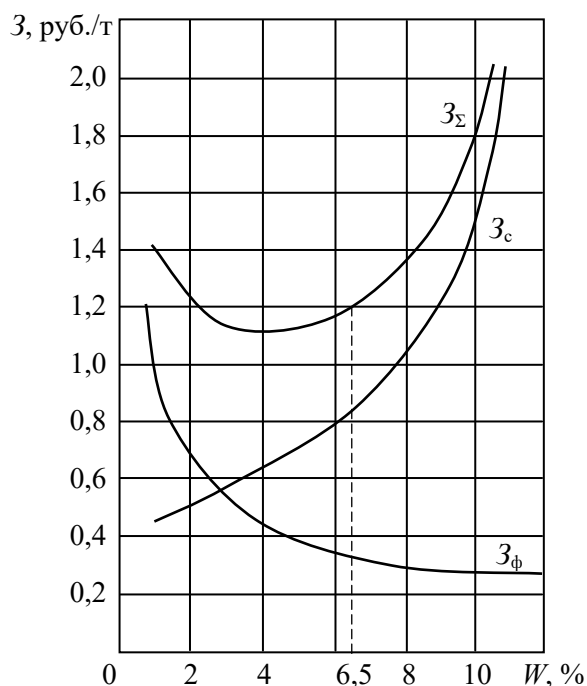


Рисунок 1. – Зависимость приведенных затрат процессов фильтрации и сушки концентрата СОФ от влажности осадка

фильтровально-сушильного комплекса Z_{Σ} от влажности осадка W после вакуум-фильтров следует, что оптимальное управление соответствует значению $W = 4$ %. Однако действующие на калийных предприятиях вакуум-фильтры позволяют обезвоживать концентрат до влажности 6,5-12 %. В этом диапазоне суммарные приведенные затраты определяются, в основном, затратами на сушку, что следует из сравнения поведения графиков, определяющих зависимость удельных затрат на сушку Z_c и на фильтрацию Z_f от влажности осадка. Уменьшение влажности осадка незначительно увеличивает затраты на фильтрацию и в то же время существенно снижает затраты на сушку. Получение же концентрата на выходе барабанных сушилок определенной влажности повышает его качество, исключает дополнительный расход топлива и выгорание остаточных флотореагентов (антислеживающих добавок) при сушке, а следова-

тельно, уменьшает их расход при последующем введении в высушенный концентрат для предотвращения его слеживаемости и также снижает суммарные затраты при обезвоживании.

Так как мы рассматриваем существующее фильтровальное оборудование (барабанные вакуум-фильтры с наружной фильтрующей поверхностью), при котором влажность осадка выше 6,5 %, то исходя из вышеизложенного, минимум суммарных затрат

ФСК можно достичь последовательным решением задач оптимального управления процессами фильтрования и сушки калийного концентрата, где решением первой задачи необходимо обеспечить минимум усредненной влажности общего осадка всех вакуум-фильтров, решением второй – минимум эксплуатационных затрат, связанных с расходом топлива и антислеживающей добавки на единицу высушенного концентрата.

Решение поставленных задач возможно только путем разработки и внедрения АСУ, которая, как было сказано ранее, должна воедино связать процессы фильтрования и сушки и управлять всем комплексом процессов в целом.

Получены результаты идентификации технологических процессов сушильно-фильтровального комплекса применительно к СОФ. Экспериментально-статистическим методом получены математические модели барабанного вакуум-фильтра и барабанной сушилки, устанавливающие связь влажности осадка, производительности по твердому, влажности высушенного концентрата, содержания в нем остаточных флотореагентов (антислеживающих добавок) с входными переменными, управляющими и возмущающими воздействиями рассматриваемых аппаратов [8].

Все полученные модели, как нелинейные, так и линейные, адекватны рассматриваемым объектам, по точности находятся практически на одном и том же уровне и поэтому могут быть применены при исследовании режимов функционирования аппаратов ФСК и разработке алгоритмов управления. Однако, применение нелинейных моделей затруднено при решении задач оптимизации, поэтому для целей автоматизированного управления взяты более простые линейные математические модели.

Результаты решения задачи идентификации на нескольких параллельно работающих вакуум-фильтрах и сушильных барабанах показали, что каждый промышленный аппарат, несмотря на их однотипность, имеет определенную специфику или, иначе говоря, собственную нагрузочную характеристику. Это связано с неравномерностью износа, различием значений управляющих и возмущающих воздействий, например, отличием в значении подсосов для сушилок, состояния фильтроткани для вакуум-фильтров, различием конструктивных элементов рассматриваемых аппаратов.

С учетом вышеизложенного в общем виде линейные математические модели статистики для i -ого вакуум-фильтра, k -ой сушилки и всего ФСК в целом запишутся:

$$W_i^{\text{oc}} = a_{0i} + a_{1i} N_i - a_{2i} P + a_{3i} \beta^{\text{пит}} + a_{4i} \rho, \quad i = 1, \bar{m}; \quad (1)$$

$$Q_i^{\text{TB}} = b_{0i} + b_{1i} N_i + b_{2i} P - b_{3i} \rho, \quad i = 1, \bar{m}; \quad (2)$$

$$W_k^{\text{C}} = -c_{0k} + c_{1k} Q_k + c_{2k} W - c_{3k} Q_k^{\text{T}} + c_{4k} \beta - c_{5k} t_k^{\text{отх}}, \quad k = 1, \bar{n}; \quad (3)$$

$$\alpha_k^{\text{C}} = -d_{0k} + d_{1k} \alpha + d_{2k} Q_k + d_{3k} W - d_{4k} t_k^{\text{отх}}, \quad k = 1, \bar{n}, \quad (4)$$

где W_i^{oc} – влажность осадка, %;

N_i – скорость вращения барабана вакуум-фильтра, об/мин;

P – величина вакуума, подводимого к барабанам вакуум-фильтров, кгс/см²;

$\beta^{\text{пит}}$ – массовая доля нерастворимого остатка (н.о.), %;

ρ – массовое отношение жидкой фазы к твердой, ж:т;

i – номер вакуум-фильтра;

Q_i^{TB} – производительность фильтра по твердому, т/ч;

W_k^{C} – влажность высушенного концентрата, %;

Q_k – расход концентрата, поступающего в сушилку, т/ч;

W – его влажность, %;

Q_k^{T} – расход топлива, кг/ч;

β – массовая доля н.о. в поступающем концентрате, %;

$t_k^{\text{отх}}$ – температура отходящих газов, °C;

α_k^c – массовая доля антислеживающей добавки в высушенном концентрате, г/т;

α – массовая доля антислеживающей добавки в поступающем концентрате, г/т;

k – номер барабанной сушилки;

$a_{ji}, b_{ji}, c_{jk}, d_{jk}$ – параметры при переменных.

Из полученных уравнений видно, что влажность осадка, производительность по твердому барабанного вакуум-фильтра зависят, прежде всего, от скорости вращения барабана, величины вакуума, подводимого к барабану, соотношения жидкой и твердой фаз суспензии питания. Значительное влияние на влажность осадка оказывает содержание н.о. в суспензии питания. Повышенное содержание н.о. в суспензии увеличивает влажность осадка и вызывает дополнительный расход топлива при сушке последнего, что следует из уравнения (3). Наличие н.о. в суспензии питания, поступающей на фильтрование, и концентрате, поступающем на сушку, является специфичным, отрицательным явлением для процессов обезвоживания СОФ. Также специфичным для ФСК СОФ является наличие остаточных флотореагентов-аминов в концентрате, поступающем в сушилку. Исключение их излишнего выгорания – одна из основных задач экономичного ведения процесса сушки.

Фильтровально-сушильный комплекс СОФ, как известно, включает в себя последовательное соединение ряда параллельно работающих барабанных вакуум-фильтров и барабанных сушилок.

На рисунке 2 представлена упрощенная схема цепи аппаратов комплекса, состоящая из m вакуум-фильтров $\Phi_1, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_m$ и n барабанных сушилок $C_1, \dots, C_k, \dots, C_n$, распределительной емкости (РЕ), установленной перед вакуум-фильтрами, распределительного конвейера (РК) – перед сушильными барабанами, и сборного конвейера (СК) – после барабанов.

Концентратная суспензия с общим расходом по твердому Q_0 (м³/ч) подается в РЕ и распределяется $Q_1^{\text{пит}}, \dots, Q_i^{\text{пит}}, \dots, Q_m^{\text{пит}}$ между вакуум-фильтрами $\Phi_1, \dots, \Phi_i, \dots, \Phi_m$. Отфильтрованный влажный концентрат после вакуум-фильтров

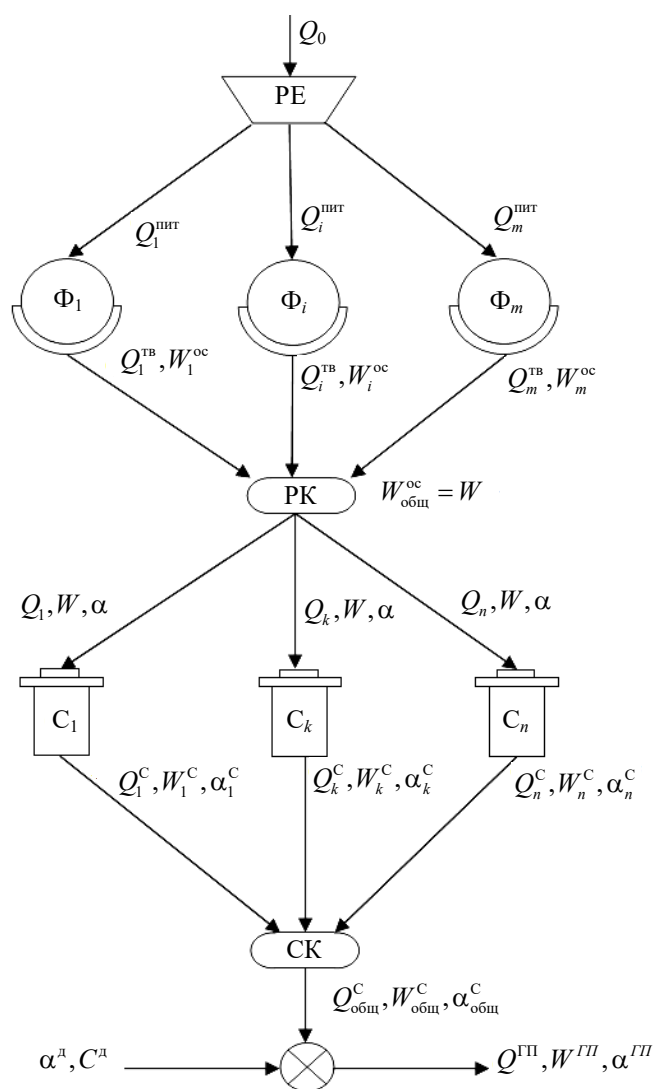


Рисунок 2. – Упрощенная схема цепи аппаратов

подается на РК и далее с него распределяется $Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_n$ (т/ч) по сушильным барабанам $C_1, \dots, C_k, \dots, C_n$. Высушенный концентрат после сушильных барабанов подается на общий СК, далее в смесителе обрабатывается антислеживающей добавкой ($\alpha^{\text{д}}$ – удельный расход антислеживающей добавки, г/т; $C^{\text{д}}$ – расход антислеживающей добавки, т) и направляется на склад готовой продукции ($Q^{\text{гп}}$ – расход готового продукта, т/ч; $W^{\text{гп}}$ – влажность готового продукта, %; $\alpha^{\text{гп}}$ – содержание антислеживающей добавки в готовом продукте, г/т).

Уравнения (1)-(4) использованы в дальнейшем для определения оптимальных управляющих воздействий каждого из m параллельно работающих вакуум-фильтров и n барабанных сушилок.

Используя аддитивность общего критерия оптимизации, введем для процесса фильтрования следующую целевую функцию, обеспечивающую минимум влажности общего осадка, при заданном общем расходе (нагрузке) по твердому и условиях (1), (2):

$$W_{\text{общ}}^{\text{ос}} = \sum_{i=1}^m \frac{W_i^{\text{ос}} \cdot Q_i^{\text{тв}}}{100 - W_i^{\text{ос}}} \bigg/ \sum_{i=1}^m \frac{Q_i^{\text{тв}}}{100 - W_i^{\text{ос}}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Аналогичным образом вводится целевая функция для процесса сушки, учитывающая как расход топлива, так и степень выгорания антислеживателя в процессе сушки, при заданной общей нагрузке по влажному концентрату и условиях (3), (4):

$$\tilde{C}_{\gamma\text{г}} = \left(S^{\text{т}} \cdot \sum_{k=1}^n g_k^{\text{т}} \cdot Q_k^{\text{с}} - S^{\text{г}} \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k^{\text{с}} \cdot Q_k^{\text{с}} \right) \bigg/ \sum_{k=1}^n Q_k^{\text{с}} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где $\tilde{C}_{\gamma\text{г}}$ – переменная часть эксплуатационных затрат, связанных с расходами топлива и антислеживателя, руб./т;

$S^{\text{т}}$ – цена топлива, руб./кг;

$g_k^{\text{т}}$ – удельный расход топлива, кг/т;

$Q_k^{\text{с}}$ – расход высушенного концентрата, т/ч;

$S^{\text{г}}$ – цена реагента-антислеживателя, руб./г.

Одновременно вводится следующее ограничение: усредненная влажность общего потока концентрата после барабанных сушилок на сборном конвейере $W_{\text{общ}}^{\text{с}}$ должна соответствовать заданному значению M :

$$W_{\text{общ}}^{\text{с}} = \sum_{k=1}^n W_k^{\text{с}} \cdot Q_k^{\text{с}} \bigg/ \sum_{k=1}^n Q_k^{\text{с}} = M = \text{const}. \quad (7)$$

В выражениях (5), (6) используются индивидуальные характеристики параллельно работающих вакуум-фильтров и сушилок, рассмотренные ранее, что позволяет определить оптимальные значения управляющих воздействий для всех аппаратов ФСК.

Кроме того, решения обеих задач связаны с ограничениями, накладываемыми на управляющие переменные: скорость вращения барабанов вакуум-фильтров, нагрузку концентрата и расход топлива в барабанных сушилках.

Разработанные критерии и задачи управления технологическими процессами ФСК имеют однозначную связь с суммарными затратами всего комплекса в условиях сильвинитовых обогатительных фабрик. Решение поставленных задач получено методом неопределенных множителей Лагранжа, позволяющим свести задачи с ограничениями к обычным экстремальным задачам без ограничений. При этом первая задача (5) сводится к решению системы линейных, а вторая (6) – к решению системы нелинейных уравнений.

Аналитическим решением системы линейных уравнений получена формула для определения оптимальных значений скоростей вращения барабанов вакуум-фильтров:

$$N_i = -\frac{\beta_i}{\alpha_i} - b_{1i} \left(\sum_{i=1}^m A_i - Q_0 - \sum_{i=1}^m b_{1i} \cdot \frac{\beta_i}{\alpha_i} \right) / \sum_{i=1}^m b_{1i}^2, \quad i = 1, \bar{m}; \quad (8)$$

$$\beta_i = (a_{1i} A_i + b_{1i} B_i) \cdot Q_0^{-1};$$

$$B_i = a_{0i} - a_{2i} P + a_{3i} \beta^{\text{пит}} + a_{4i} p;$$

$$\alpha_i = 2a_{1i} \cdot b_{1i} \cdot Q_0^{-1};$$

$$A_i = b_{0i} + b_{2i} P - b_{3i} p.$$

Правильность вывода формулы подтверждена решением этой задачи, у которой целевая функция имеет сепарабельный вид, также методом динамического программирования. Показаны преимущества этого метода по сравнению с другими.

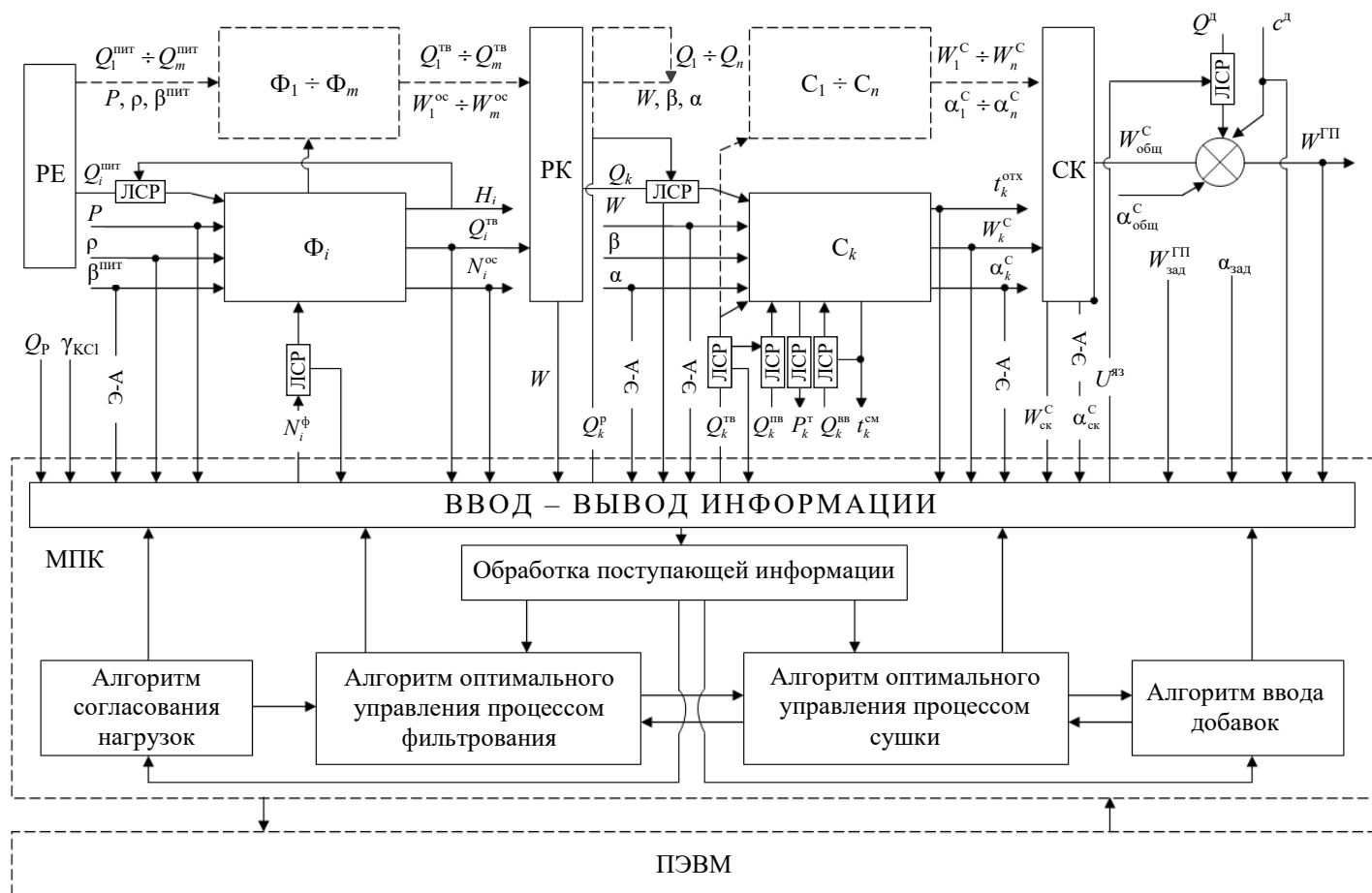
Решение системы нелинейных уравнений задачи оптимального управления процессом сушки производилось методом Ньютона, в результате были определены оптимальные значения расходов концентрата, поступающего на барабанные сушилки, и соответствующие им расходы топлива. В соответствии с методами и алгоритмами решения задач идентификации и статической оптимизации разработаны алгоритмы оптимального управления, предусматривающие корректировку параметров моделей в случае разбаланса между расчетными и фактическими значениями выходных переменных. Разработаны также алгоритмы согласования нагрузок и ввода антислеживающих добавок в концентрат, обеспечивающие нормальное функционирование алгоритмов оптимального управления процессами фильтрования и сушки и выполнение требований, предъявляемых к качеству выпускаемого концентрата. Указанные алгоритмы объединены в общий (комплексный) алгоритм управления ФСК СОФ, обеспечивающий минимизацию суммарных приведенных затрат на обезвоживание единицы продукции [9].

Реализация разработанных алгоритмов управления обеспечивается АСУТП ФСК, иерархическая структура которой представлена на рисунке 3.

Автоматизированное управление ФСК СОФ осуществляется в режиме supervisory управления решением задач параметрической идентификации и статической оптимизации процессов фильтрования и сушки, согласования нагрузок и ввода водорастворимых антислеживающих добавок в высушенный концентрат с последующей реализацией управляющих воздействий. Локальные системы автоматического контроля и регулирования процессов ФСК, обеспечивающие нормальное функционирование разработанной АСУ, частично или полностью внедрены в промышленных условиях обогатительных фабрик АО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий». Проведено опробование разработанных алгоритмов управления ФСК в промышленных условиях СОФ. Испытания показали, что применение АСУ в соответствии с разработанными алгоритмами позволяет значительно снизить топливно-энергетические затраты, а содержание остаточных флотореагентов (антислеживателей) в высушенном концентрате увеличить, что в целом снижает эксплуатационные затраты на единицу продукции [9, 10].

Необходимо отметить, что данная работа отражает современный цифровой уровень решения поставленных задач, в подобном формате она может использоваться как на калийных, так и других горно-обогатительных предприятиях, обеспечивая при реализации высокую прибыльность. Математические модели процессов являются основой для создания цифрового двойника, обеспечивающего компьютерное представление ре-

шения задачи, что позволяет заранее имитировать производственные процессы и заблаговременно определять их оптимальные варианты [11].



МПК – микропроцессорный контроллер; Э-А – экспресс-анализ;

ЛСР – локальная система регулирования

Рисунок 3. – Структурная схема системы автоматизированного управления ФСК

Заключение. Обобщая изложенный материал, можно сделать следующее заключение.

1. По результатам исследований процессов фильтрации и сушки, рассмотренных как единый объект управления применительно к СОФ, получена математическая модель фильтровально-сушильного комплекса, устанавливающая связь основных технико-экономических показателей процессов фильтрации и сушки от входных переменных, управляющих и возмущающих воздействий, разработаны алгоритмы и системы управления отдельными технологическими процессами и комплексом процессов обезвоживания в целом.

2. Показано, что для эффективного управления фильтровально-сушильным комплексом наиболее целесообразно использовать экономический критерий, обеспечивающий минимизацию суммарных приведенных затрат в расчете на единицу продукции при обеспечении условий обработки всего поступающего концентрата и заданного качества готового продукта.

3. Учитывая аддитивность предложенного критерия, показано, что последовательная раздельная оптимизация процессов фильтрации и сушки позволяет осуществ-

вить оптимизацию работы фильтровально-сушильного комплекса в целом. Разработаны критерии и сформулированы задачи управления процессами фильтрации и сушки, обеспечивающие как оптимальное управление отдельными аппаратами, так и оптимальное распределение потоков питания между параллельно работающими вакуум-фильтрами и сушильными барабанами в зависимости от их индивидуальных характеристик и в соответствии с производительностью предшествующих переделов.

5. Разработаны алгоритмы оптимального управления процессами фильтрации и сушки, включающие, наряду с идентификацией и оптимизацией процессов, корректировку параметров моделей в случае разбаланса между расчетными и фактическими значениями выходных показателей.

6. Разработана иерархическая структура системы автоматизированного управления ФСК, которая позволяет воедино связать технологические процессы фильтрации и сушки и управлять всем комплексом процессов в целом, обеспечивая при этом минимальные затраты на обезвоживание при заданном качестве высушенного концентрата по влажности и слеживаемости.

7. Проведено опробование разработанных алгоритмов управления в промышленных условиях СОФ. Испытания показали, что применение автоматизированного управления в соответствии с разработанными алгоритмами позволяет значительно снизить топливно-энергетические и эксплуатационные затраты на единицу продукции.

8. Данная работа отражает современный цифровой уровень решения поставленных задач, в подобном формате она может использоваться, как на калийных, так и других горно-обогатительных предприятиях, обеспечивая при реализации высокую прибыльность. Разработанные математические модели процессов являются основой для создания цифрового двойника, позволяющего заранее имитировать производственные процессы и заблаговременно определять их оптимальные варианты.

Список использованных источников

1. Немчинов, В.П. Качество, эффективность, цена топлива / В.П. Немчинов. – М.: Недра, 1983. – 175 с.
2. Стальский, В.В. Автоматизация управления процессами обезвоживания на обогатительных фабриках / В.В. Стальский. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
3. Головкин, Б.Ю. Автоматизация калийных обогатительных фабрик / Б.Ю. Головкин, Г.Г. Колпиков, Л.А. Рейбман. – М.: Недра, 1983. – 200 с.
4. Бояринов, А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1975. – 576 с.
5. Вишняк, Б.А. Исследование параметров контроля и управления процессами фильтрации и сушки калийного концентрата / Б.А. Вишняк, Ю.И. Левчишин, Р.Х. Нураев, Н.И. Заяц // Автоматизация технологических процессов калийных фабрик: сб. науч. тр. / Всесоюз. науч.-иссл. и проект. ин-т галургии; под ред. Г.Г. Колпикова. – Л.: ВНИИГ, 1982. – С. 49-56.
6. Шински, Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии / Ф. Шински. – М.: Мир, 1981. – 388 с.
7. Способ автоматического управления параллельно работающими сушильными агрегатами: а. с. 1099200 СССР, МКИ F26B25/22 / Р.Х. Нураев, Б.А. Вишняк, Б.Ю. Головкин, А.Д. Школьников, Г.Г. Колпиков, Л.А. Рейбман, Ю.И. Левчишин; Всесоюзный

науч.-иссл. и проект. ин-т галургии. – № 3550552/24-06; заявл. 08.02.83; опубл. 23.06.84 // Открытия. Изобрет. – 1984. – Бюл. № 23.

8. Вишняк, Б.А. Управление сушильно-фильтровальным комплексом на калийных обогатительных фабриках / Б.А. Вишняк // Горное дело. – 1984. – № 11. – С. 12.

9. Вишняк, Б.А. Автоматизированное управление сушильно-фильтровальным комплексом сильвинитовых обогатительных фабрик: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.07 / Б.А. Вишняк; Ленингр. горн. ин-т им. Г.В. Плеханова. – Л., 1984. – 22 с.

10. 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.

11. Райффершайд, М. Цифровые технологии в черной металлургии – стратегии, концепции и решения / М. Райффершайд // Черные металлы. – 2018. – № 6. – С. 62-67.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

Tatiana Vladimirovna Serebrova – Head of the Joint-stock company “KANEX TECHNOLOGY” of the KANEX Group of Companies, (13/37, 2nd Zvenigorodskaya Str., Moscow, Russia), e-mail: t.serebrova@kanexgroup.ru.

Поступила в редакцию 30.06.2021 г.

УДК 661.152-026.772(045)

Н.А. Высоцкая

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

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Аннотация. При гранулировании минеральных удобрений в барабанном грануляторе-сушилке размер гранул зависит от технологического режима гранулирования. Неотъемлемой частью процесса гранулообразования является наличие жидкой фазы. Изменение ее содержания оказывает большое влияние на процесс гранулирования. Поверхность частиц имеет немаловажное значение в процессе гранулирования. Температура и влажность при гранулировании взаимосвязаны: с уменьшением температуры влажность увеличивается. Наиболее важными потребительскими свойствами минеральных удобрений являются истираемость гранул, слеживаемость, пылимость, гранулометрический состав и прочность.

Ключевые слова: гранулирование, температура, влажность, минеральные удобрения, жидкая фаза.

N.A. Vysotskaya

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

BASIC PHYSICO-CHEMICAL AND STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF GRANULATED MINERAL FERTILIZERS

Abstract. When granulating mineral fertilizers in a drum granulator-dryer, the size of the granules depends on the technological mode of granulating. An integral part of the granule formation process is the presence of a liquid phase. Changing the content of the liquid phase strongly affects the granulation process. The surface of the particles is of great importance in the granulation process. Temperature and humidity during granulation are interrelated: with decreasing temperature, humidity increases. The most important consumer properties of mineral fertilizers are: abrasion of granules, caking, dustiness, particle size distribution and strength.

Keywords: granulation, temperature, humidity, mineral fertilizers, liquid phase.

Введение. Во многих отраслях промышленности, в том числе в сельском хозяйстве, широкое применение получили гранулированные материалы [1, 2]. 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 [4].

Основная часть. Основным оборудованием для грануляции тонкодисперсных порошков является барабан-гранулятор. К конструктивным параметрам барабана-гранулятора относятся: диаметр барабана-гранулятора, длина обечайки, высота борта, угол наклона. К динамическим характеристикам процесса окатывания относятся: коэффициент заполнения и скорость вращения аппарата, время пребывания в нем материала, определяющие скорость и число соударений гранул.

Чем больше число соударений между гранулами либо о стенки барабана, тем они больше и плотнее. С увеличением скорости скатывания размер гранул вначале рас-

тет. Затем, когда скорость превысит допустимую для данного размера гранул, происходит их измельчение.

Размер гранул зависит от технологического режима гранулирования, а именно: от химических составов связующего и материала, гранулометрического состава исходного материала – шихты, температуры, количественного соотношения компонентов.

Неотъемлемой частью процесса гранулообразования является наличие жидкой фазы. Изменение ее содержания оказывает большое влияние на процесс гранулирования. С увеличением количества связующего уменьшаются динамические нагрузки и время окатывания, возрастают прочность и плотность гранул. Содержание жидкой фазы изменяется в зависимости от фракционного состава исходного сырья.

Поверхность частиц имеет немаловажное значение в процессе гранулирования. При измельчении поверхность имеет неупорядоченное расположение молекул, она является аморфной и активной по отношению к адгезии. В процессе длительного хранения, сушки, а также в присутствии примесей поверхностная активность снижается. Размер гранул зависит от равномерного распределения связующего. Неравномерность гранулометрического состава приводит к переувлажнению шихты и образованию крупных комков и гранул.

На равномерность увлажнения влияет метод распыливания жидкости. В результате грубого диспергирования образуются крупные капли, вокруг которых возникают комки. При хорошем перемешивании и мелкодисперсном распылении жидкости происходит хорошая гомогенизация шихты, это обеспечивает узкий гранулометрический состав продукта. На начальной стадии увлажняют крупными каплями. Жидкая фаза образуется внутри системы в виде плава или раствора.

На растворимость и содержание плава влияет температура, поэтому, чем ниже температура, тем больше требуется вводить жидкой фазы. Температура и влажность взаимосвязаны: с уменьшением температуры аммофоса от 85 до 50 °С оптимальная влажность увеличивается с 4 % до 10,5 %. Увеличение температуры шихты приводит к возрастанию доли жидкой фазы во всем объеме материала, независимо от диспергирования жидкости и перемешивания материала. Увеличение доли жидкой фазы, образуемой внутри системы, приводит к увеличению выхода товарной фракции.

С повышением температуры изменяется поверхностное натяжение, вязкость и количество жидкой фазы. С увеличением поверхностного натяжения увеличивается удельная сила связи между частицами.

С повышением температуры при окатывании образуются более плотные гранулы, о чем свидетельствует увеличение их прочности. При увеличении температуры с 40 до 70 °С прочность гранул суперфосфата при влажности 3,5 % увеличивается с 1,0 до 2,0 МПа, а прочность гранул аммофоса влажностью 0,8 % возрастает с 3,5 до 6,0 МПа.

Увеличение температуры при гранулировании позволяет снизить содержание влаги в шихте, поступающей на сушку, а также получить более прочные гранулы. Снижение содержания влаги в шихте, подающейся на сушку, приводит к увеличению производительности всей технологической линии без изменения объема влаги в сушильном барабане.

Сложные минеральные удобрения гранулируют при 75-110 °С, при более высоких температурах наблюдаются значительные потери аммиака.

Представляет интерес способ нагрева шихты. Наиболее эффективный нагрев наблюдается на стадии окатывания, поскольку на стадии увлажнения жидкая фаза присутствует в основном на поверхности частиц, и повышение температуры приводит к

образованию комков. При дальнейшем окатывании полученных гранул влага частично уходит с поверхности частиц, а ее недостаток компенсируется нагревом.

При гранулировании происходит нагрев самой шихты либо стенки гранулятора. Наиболее прост и эффективен метод подвода тепла с твердой и жидкой фазами гранулируемого продукта. При получении аммофоса требуемая температура гранулирования достигается поддержанием максимально возможных температур пульпы, ретур и порошкообразного аммофоса из распылительных сушилок. Температура пульпы при этом достигает 100 °С, а порошкообразного аммофоса из распылительных сушилок – 90 °С. В промышленных условиях поддерживать такой температурный режим трудно, поэтому температуру допустимо понижать до 80-85 °С путем ввода пара под слой гранулируемого аммофоса в необходимом количестве для создания оптимальных условий гранулообразования.

Смешиваемый с гранулируемым материалом пар конденсируется, нагревает шихту и одновременно увлажняет ее. Введение дополнительного количества влаги с паром целесообразно в том случае, если вода является связующим по технологии. При гранулировании суперфосфата шихту в грануляторе в основном увлажняют водой до влажности 16-18 %. Температура гранулирования составляет 20-40 °С. Ввод в гранулятор пара позволяет уменьшить расход воды на увлажнение, снизить оптимальную влажность шихты до 11-13 %, а также повысить ее температуру до 60-70 °С. В результате повышается производительность технологической линии на 15-20 % и увеличивается прочность гранул.

С целью увеличения температуры в зону гранулирования вместо пара подают горячую воду, дымовые газы, вещества, реагирующие с выделением тепла, стоки от абсорбции. Наиболее эффективно проведение экзотермической реакции, так как тепло выделяется равномерно по всей шихте, и в момент воздействия динамических нагрузок это исключает перегревы и потери тепла.

В производстве минеральных удобрений используют реакцию аммонизации кислых солей и кислот. В результате этой реакции не только увеличивается температура, но и изменяется химический состав материала шихты, как следствие, изменяются условия гранулирования.

Технология получения аммофоса заключается в сушке части пульпы в распылительной сушилке, увлажнении полученного порошка другой частью пульпы и окатывании этой смеси в барабане. Аммофос налипает на стенки и пересушивается, порошок выходит повышенной крупности с большим количеством комков. Это затрудняет эксплуатацию распылительных сушилок, так как необходимо отделять и измельчать образовавшиеся комки.

При введении в шихту сухого продукта, неудовлетворяющего техническим требованиям, содержание жидкой фазы на поверхности его частиц значительно выше, чем по всему объему. Чем больше ретур и чем он крупнее, тем меньше поверхность частиц и выше ее влагосодержание в начальный момент времени. Влияние количества ретур и размера частиц на диаметр гранул особенно заметно при большом содержании влаги в шихте, так как в этом случае любое изменение влагосодержания приводит к значительному изменению диаметра. Изменяя количество ретур и размер частиц можно получить продукт с определенным размером гранул при различном влагосодержании исходного материала (шихты). При постоянном диаметре ретур для получения продукта определенного размера влагосодержание шихты должно увеличиваться с уменьшением количества ретур. Чем меньше диаметр частиц ретур, тем больше должно быть его

количество при средней влажности шихты. Чем больше ретура, тем меньше диаметр гранул продукта.

При повышенных температурах гранулирование сопровождается химической реакцией, характеризуемой тепло- и массообменом [5]. Удаление жидкой фазы обеспечивается кристаллизацией и испарением, условия гранулирования меняются, фиксируются связи, образовавшиеся между частицами, препятствуя разрушению гранул. В результате процесс гранулообразования завершается быстрее.

В технике гранулирования минеральных удобрений наиболее благоприятен режим, при котором средний размер гранул изменяется только в начальный момент, а затем при окатывании и уплотнении гранул он изменяется незначительно. При гранулировании двойного суперфосфата в промышленных условиях средний размер гранул формируется в первые 2-3 мин, затем его рост резко замедляется, в то же время происходит измельчение крупных гранул и рост мелких. Необходимое для окатывания время определяется только динамическими усилиями, воздействующими на гранулу, и требуемой плотностью. В начальный момент времени диаметр гранул растет с малой скоростью, затем – быстрее, и при влагосодержании, близком к массовому слипанию в комки, незначительное увеличение содержания жидкости приводит к резкому увеличению диаметра.

Наиболее важными потребительскими свойствами минеральных удобрений являются истираемость гранул, слеживаемость, пылимость, гранулометрический (фракционный) состав и прочность. Эти характеристики зависят от многих факторов: как внутренних (свойства компонентов удобрений, способ и параметры процесса производства), так и внешних (условия окружающей среды, в которых удобрение находится при транспортировании, перевалках и хранении) [6, 7].

Прочность гранул характеризуется такими показателями как:

- прочность на истирание $P_{и}$;
- динамическая прочность $P_{д}$;
- статическая прочность $P_{с}$.

Истираемость гранул определяется как доля порошковидной фракции, которая образуется в результате трения во вращающемся барабане, и применяется для оценки потерь продукта при перевалках, внесении и др. Истираемость гранул определяется морфологией их поверхности, прочностью приповерхностного слоя и сферичностью.

Динамическая прочность $P_{д}$ гранул характеризует их поведение под воздействием ударных нагрузок. Определяется долей разрушенных гранул при их ударе о твердую поверхность.

Статическая прочность $P_{с}$ определяется усилием разрушения гранул под действием одноосного сжатия при медленном наращивании внешнего усилия. Принцип метода определения статической прочности заключается в измерении силы, необходимой для разрушения до 100 гранул определенной фракции при одноосном сжатии между двумя параллельными плоскостями. Данный показатель дает прогноз о том, какая часть гранул продукта разрушится под воздействием массы верхних слоев при хранении. По сравнению с динамической прочностью и прочностью на истирание статическая прочность является наиболее чувствительным показателем и наиболее полно отражает изменения физико-механических свойств гранул в зависимости от влажности. Статическая прочность гранул зависит, первоочередно, от метода и параметров процесса гранулирования, а также от влажности продукта и химического состава.

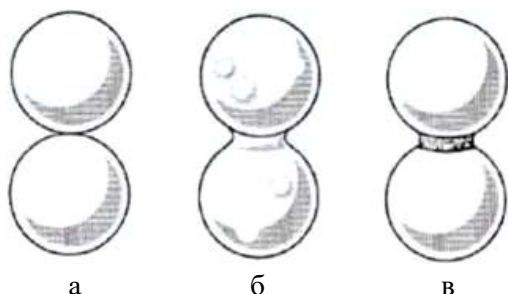
Все три показателя прочности в совокупности характеризуют способность гранул минеральных удобрений сохранять форму и размеры под воздействием внешних

сил. Потери продукта в результате дробления и истирания при транспортировке, перевалках и хранении могут достигать 7 % [8].

Повышенная влажность приводит к слеживанию. *Слеживаемость* – потеря сыпучести гранулированных и порошкообразных материалов и их переход в комкообразное состояние. Слежавшаяся партия продукта в полном объеме теряет свои потребительские свойства.

К основным факторам, определяющим слеживаемость минеральных удобрений, относятся физико-химические свойства продукта и внешние условия. К физико-химическим свойствам самого продукта относят: гигроскопичность, влажность, химический состав удобрения, гранулометрический состав продукта, прочность и структуру гранул. К внешним условиям относят: температуру и влажность окружающей среды, продолжительность хранения и др.

Механизм процесса слеживания заключается в следующем. На поверхности зерен образуется жидкая пленка насыщенного раствора и мениски в зоне соприкосновения



а – сухие гранулы; б – увлажненные гранулы; в – подсушенные гранулы, образование кристаллического мостика между гранулами

Рисунок. – Формирование кристаллического мостика между частицами вещества в цикле увлажнение - подсыхание

гранул. При изменении температуры и относительной влажности в результате пересыщения раствора из него могут выпадать кристаллы, формирующие фазовые контакты между гранулами [9] (рисунок).

Также существует еще один механизм образования фазовых контактов: фазовые контакты формируются в результате процесса самодиффузии солей на поверхности гранул. Слеживаемость – есть результат поверхностной диффузии наиболее подвижных солей, имеющих высокое значение коэффициента поверхностной диффузии в зону контактов гранул.

Наиболее важным фактором, определяющим склонность гранул минеральных удобрений к слеживанию, является его фазовый и химический состав, который опреде-

ляет способность некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха.

Степень и характер протекания химических реакций в основном зависят от способа ввода сырья, их фракционного состава, а также влажности продукта.

Гигроскопичность – свойство компонентов минеральных удобрений самопроизвольно поглощать влагу из окружающей среды. Гигроскопичность является одним из главных факторов, влияющих на слеживаемость продукта.

Для прогнозирования поведения сложного минерального удобрения определенной марки в изменяющихся условиях окружающей среды необходимо располагать информацией об изотерме сорбции влаги данным продуктом в рабочем диапазоне температур.

Большое значение для сохранности потребительских свойств продукта имеют условия его *транспортировки и хранения*. Основными проблемами при транспортировке и хранении удобрений навалом являются влажность воздуха, резкие перепады температуры, осадки. При хранении удобрений в биг-бегах, при резких колебаниях температуры окружающей среды, внутри упаковки также могут возникать колебания влажности воздуха в пространстве между гранулами. Это приводит к слеживанию продукта.

При хранении теплого продукта в холодном неотапливаемом цехе в приповерхностном слое насыпи удобрения при контакте с холодным воздухом образуется конденсат, который приводит к слеживанию гранул минеральных удобрений. Рекомендуется поддерживать разницу температур продукта и воздуха на складе (в цехе) минимальной путем использования отапливаемых складов или путем охлаждения отгружаемого на склад продукта. Допустимой температурой гранул минеральных удобрений при отгрузке считается 50 °С. Допускается охлаждать удобрения на основе фосфата и сульфата аммония до температуры 40-45 °С.

Транспортировку удобрений насыпью осуществляют в специализированных крытых вагонах, предназначенных для перевозки минеральных удобрений. Также транспортировка осуществляется в полувагонах, автомобильным транспортом, водным транспортом в открытых и закрытых палубных судах.

Гранулометрический состав – процентное содержание гранул определенного размера в минеральном удобрении. Для большинства выпускаемых удобрений основная фракция составляет 2-4 мм. Увеличение содержания мелкой фракции в удобрениях приводит к интенсивному слеживанию.

Пылимость – способность удобрения образовывать тонкодисперсные пылевидные частицы при пересыпании или при транспортировке.

Факторы, влияющим на пылимость: химический состав удобрения, способ его производства, прочность гранул и их форма, влажность, гранулометрический состав, а также условия транспортировки и перевалки. С уменьшением влажности пылимость увеличивается.

Зависимость пылимости продукта от его влажности обусловлена пористой структурой гранул. При влажности менее 1 % практически вся вода находится во внутреннем пространстве капилляров и, следовательно, не может смачивать и удерживать частицы образующейся пыли на поверхности гранул. Пылимость значительно возрастает при увеличении массовой доли фракции < 1 мм. Это обусловлено разрушением мелких частиц продукта при механическом воздействии.

Вывод. Большая чувствительность к содержанию жидкости в материале является основным и очень существенным недостатком гранулирования методом окатывания. Выход целевой фракции не всегда соответствует предъявляемым требованиям. Чтобы успешно вести процесс гранулирования, необходимо для каждого конкретного вещества экспериментально подобрать режим. При гранулировании, сопровождаемом тепло- и массообменом, сокращается время окатывания, это усложняет регулирование процесса.

Проблему улучшения качества минеральных удобрений следует решать в первую очередь за счет оптимизации технологического процесса.

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. Францкевич // 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. Высоцкая, Н.А. Влагосодержание шихты комплексных удобрений / Н.А. Высоцкая, В.С. Францкевич // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 63-70.
5. Броунштейн, Б.И. Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б.И. Броунштейн, В.В. Щеголев; под ред. Ю.К. Кузнецова. – Л.: Химия, 1988. – 336 с.
6. Технология минеральных удобрений: учеб. пособие / И.А. Петропавловский [и др.]. – СПб.: Проспект Науки, 2018. – 312 с.
7. Свойства, получение и применение минеральных удобрений: учеб. пособие / Б.А. Дмитриевский [и др.]. – СПб.: Проспект Науки, 2013. – 326 с.
8. Скоробогатов, В.А. Минеральные удобрения. Перегрузка на портовых терминалах: справочное пособие / В.А. Скоробогатов. – 3-е изд. – Таллин: AS DBT, 2009. – 603 с.
9. Терещенко, А.Г. Гигроскопичность и слеживаемость растворимых веществ: монография / А.Г. Терещенко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 79 с.

Информация об авторе

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

Information about the author

Nadezhda Aleksandrovna Vysotskaya – Postgraduate Student, Belarusian State Technological University, 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.

Поступила в редакцию 15.07.2021 г.

УДК 622.647.8:622.619.7:622.23.054.3(476)(045)

В.А. Тройнич¹, Д.В. Грідюшко², А.В. Брижєвич¹¹ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
г. Солигорск, Беларусь²ООО «Завод Бургормаши», г. Солигорск, Беларусь**МОДЕРНИЗАЦИЯ БУНКЕРА-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЯ ПУТЕМ УСТАНОВКИ
НА НЕГО БАРОВОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА**

Аннотация. Представлены технические характеристики и особенности работы машин врубных баровых типа МВБ-140 и МВБ-140Э производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», предназначенных для нарезки компенсационных щелей, а также бункера-перегрузателя БП-14ВБ. Произведен расчет бункера-перегрузателя. Определены основные параметры барового органа, установленного на бункер-перегрузатель. Показано, что установка барового исполнительного органа на бункер-перегрузатель обеспечивает сокращение времени от проходки выработки до проведения компенсационных щелей.

Ключевые слова: машина врубная баровая, бункер-перегрузатель, компенсационные щели, выработка, исполнительный орган.

V.A. Troinich¹, D.V. Hrydziushka², A.V. Bryzhevich¹¹JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, Soligorsk, Belarus²LLC “Plant Burgormash”, Soligorsk, Belarus**MODERNIZATION OF A HOPPER FOR PUMPING ORE BY INSTALLING
A DEVICE FOR CUTTING SLITS ON IT**

Abstract. Technical characteristics and operating features of the slot-cutting machine of JSC “Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production”, designed for slotting, as well as a bunker for ore reloading. The calculation of the bunker for ore transfer has been made. The main parameters of the device for cutting slits, installed on the bunker for ore transshipment, have been determined. It is shown that the installation of an executive body for cutting slits into a bunker for ore reloading makes it possible to reduce the time from excavating a mine to making slits in a mine working.

Keywords: slot-cutting machine, ore reloading bunker, cracks in mine workings, working out, executive body.

Введение. Устойчивость выработок во многом определяет эффективную и безопасную работу рудника и в основном зависит от горно-геологических и горнотехнических условий их сооружения и поддержания. Изменение характера и интенсивности деформационных процессов в окружающих выработки породах на больших глубинах стало причиной того, что многие известные способы поддержания, технологические и технические решения исчерпали свои возможности в части обеспечения устойчивости выработок [1]. Разработка новых технологических и технических решений по обеспечению устойчивости выработок на больших глубинах возможна только на базе результатов детального анализа условий их поддержания и состояния.

Компенсационные щели служат для охраны горных выработок и могут проводиться как в период проходки выработок, так и в процессе их эксплуатации. Проведение компенсационных щелей в подготовительных выработках на стадии отработки вы-

емочного столба должно осуществляться впереди лавы вне зоны влияния временного опорного давления. Компенсационные щели проводятся, в первую очередь, в кровле выработок, а затем, при необходимости – в боках и почве. В выработках, подлежащих креплению анкерами, и на сопряжениях выработок щель в кровле проводится после возведения крепи.

Основная часть. Для проходки компенсационных щелей используют щеленарезные машины: машины врубовые «Урал-33» и «Урал-50»; щеленарезная машина ESF-70; машины врубовые баровые МВБ-140, МВБ-140Э.

Машины врубовые баровые МВБ-140, МВБ-140Э предназначены для нарезки компенсационных щелей под любым углом по периметру горизонтальных и наклонных не более $\pm 15^\circ$ горных выработок, высотой 2,6-3,0 м, проветриваемых свежей струей, при сопротивляемости пород резанию до $A_p = 450$ Н/мм.

Отличительной особенностью серии МВБ-140Э от МВБ-140 является наличие кабельного барабана емкостью 150 м и дизельной установки для передвижения машины с маневровой скоростью. Нарезка щели происходит при подключении электрооборудования и дальнейшего движения на кабеле с выбранной рабочей скоростью [2].

Разрабатываются, проектируются и выпускаются машины врубовые баровые МВБ-140, МВБ-140Э в ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (рисунок 1) [3].

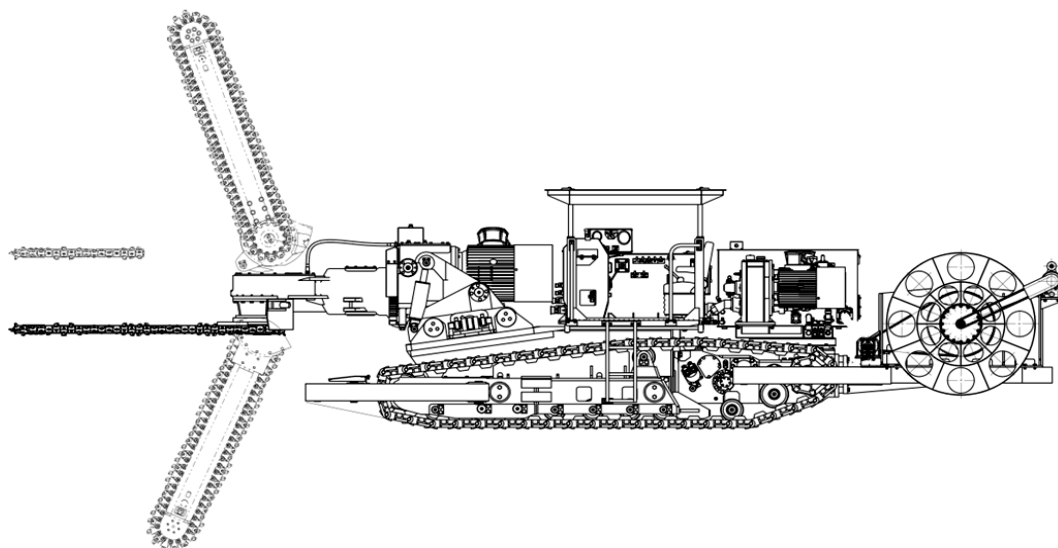


Рисунок 1. – Машина врубовая баровая производства ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (вид справа)

Область применения машины – калийные рудники, в которых возможно образование взрывоопасной газовой смеси 1 категории группы Т1 (метан) по ГОСТ 12.1.011-78 [4], в том числе выработки, проходимые по пластам с углом падения не более $\pm 3^\circ$ и крепостью пород не более 5 по шкале М.М. Протодяконова.

Основные параметры и технические характеристики машины врубовой баровой МВБ-140 приведены в таблице 1.

Машина производит нарезку компенсационных щелей баровым исполнительным органом, режущим элементом которого является цепь, движущаяся в жестком направляющем пазу бара.

Гусеничный ход осуществляет перемещение машины в рабочем и маневровом режимах. Привод гидрооборудования машины производится насосной станцией, рас-

положенной на раме ходовой части. Управление машиной осуществляется с рабочего места машиниста, расположенного на буфере с левой стороны машины.

Таблица 1. – Основные параметры и технические характеристики

Наименование параметра	Значение
Техническая производительность при сопротивляемости пород резанию $A_p = 450$ Н/мм (450 кгс/см), п.м/мин, не менее	1,5
Исполнительный орган, тип	баровый цепной
Глубина щели, м, не более	1,2
Ширина прорезаемой щели, мм	140
Тип резцов	ЗН-3
Скорость движения цепи, м/с	5,2
Ходовая часть: - тип - длина опорной поверхности гусениц, мм - расстояние между осями гусениц, мм - ширина трака, мм - максимальная скорость движения машины при маневрах, м/мин, не менее - регулирование скорости подачи	гусеничный 2535 1500 400 5 бесступенчатое
Суммарная установленная мощность двигателей, кВт в т.ч. на исполнительном органе	103 55
Рабочее напряжение, В	660/1140
Габаритные размеры: - длина, мм - ширина, мм - высота, мм	9510 2480 2380
Масса машины, т	25

Для работы на пластах, склонных к интенсивному пылеобразованию, в конструкции машины предусмотрена вентиляционная установка, подающая воздух в зону резания, для обеспечения улучшенного обзора и снижения запыленности.



Рисунок 2. – Щели, нарезанные машиной врубовой баровой

Щели, нарезанные машиной врубовой баровой, показаны на рисунке 2.

В соответствии с проектом и методикой испытаний на ведение горных работ планировалась проходка горной выработки длиной 250-300 м, затем, отгон самоходного вагона, бункера перегружателя и комбайна из зоны выработки. Далее, доставка машины баровой в пройденную выработку и нарезка компенсационных щелей для формирования

в горном массиве области измененного напряженного состояния, управления распределением напряжений посредством варьирования количеством щелей и уменьшения концентрации напряжений.

Однако до проведения работ по нарезе компенсационных щелей происходит деформирование подготовительной выработки с преждевременным разрушением в форме прогиба кровли с образованием трещин и распространением расслоений, по причине большой разницы по времени от проходки выработки до проведения компенсационных щелей, что приводит к снижению безопасности ведения работ и их остановке.

В ходе обобщения результатов испытаний предложено с целью сокращения времени по ведению комплекса работ по проходке подготовительной выработки разработать конструкцию машины, объединяющую функции бункера-перегрузателя и щеленарезной машины, соединенной жесткой сцепкой с комбайном, и управлением машинистом проходческого комбайна.

Для проведения исследований возможности ведения горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» на больших глубинах (свыше 800 м) для поддержания горных выработок определен способ охраны компенсационными щелями. Исследование проводилось с использованием комплекса оборудования, в состав которого входят:

- проходческий комбайн КРП-3-660/1140, предназначенный для проведения горных выработок арочной формы сечением 8 м² с углом наклона $\pm 15^\circ$ по соляным породам с сопротивляемостью резанию до 450 Н/мм;
- бункер-перегрузатель БП-14ВБ, служащий для накапливания отбитой руды, в то время, когда самоходный вагон совершает рейс;
- самоходный вагон 5ВС-15М, служащий для доставки отбитой руды от комбайна к ленточному конвейеру;
- машина врубовая баровая МВБ-140, предназначенная для нарезки щелей под любым углом по периметру горизонтальных и наклонных до $\pm 15^\circ$ горных выработок.

Бункер (рисунок 3) представляет собой металлический короб, состоящий из рамы, промежуточной рамы, концевой секции. В донной части бункера находится изгибающийся в вертикальной плоскости двухцепной скребковый конвейер.

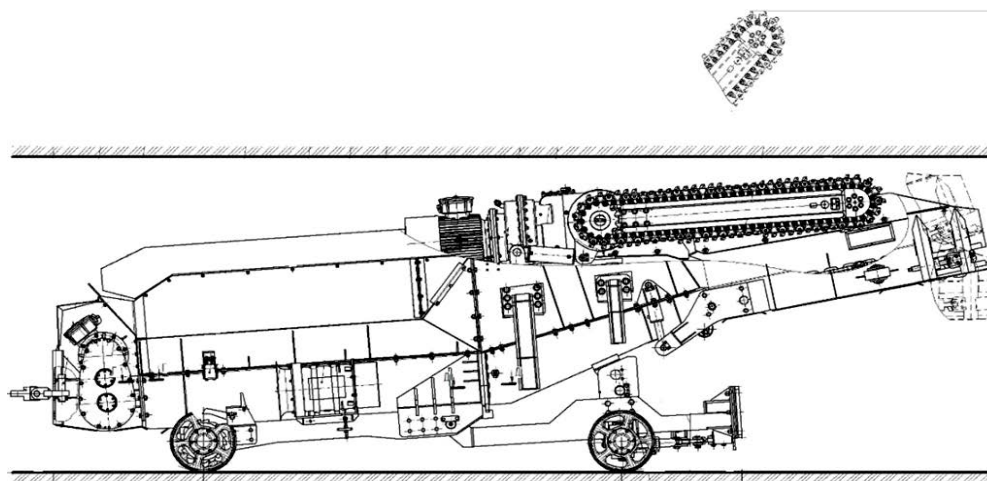


Рисунок 3. – Бункер-перегрузатель БП-14ВБ

Бункер позволяет дополнительно производить нарезку компенсационных щелей в кровле выработки. Для этого на промежуточной раме через кронштейн устанавливается баровый исполнительный орган, режущим элементом которого является цепь, движущаяся в жестком направляющем пазу бара.

Основные параметры и технические характеристики бункера приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Технические параметры бункера-перегрузателя БП-14ВБ

Наименование основных параметров и размеров	Значение
Грузоподъемность, т	16
Расчетная производительность, т/с, не менее	0,37
Время разгрузки, с, не более	45
Радиус поворота по наружному габариту, м	10 ± 0,5
Ходовая часть - тип - диаметр колес, мм - дорожный просвет, мм - тормоз, тип - рулевое управление	на металлических колесах 590 100 храповой механизм с двумя гидравлически управляемыми поворотными колесами
Исполнительный орган - тип - тип резца - ширина прорезаемой щели, мм - максимальная глубина щели в выработке высотой 3 метра, м	баровый, цепной ЗН-3 140 не более 1,38
Погрузочный орган - тип - ширина скребка, мм - шаг установки скребков, мм	скребковый, двухцепной 1228 516
Пылеподавление - вентилятор, тип - количество вентиляторов, шт. - производительность вентилятора, м ³ /с	осевой 1 1,9-3
Электрооборудование - рабочее напряжение, В - суммарная мощность электродвигателей, кВт в том числе: - привода органа исполнительного - привода конвейера - вентилятора	660/1140 70 37 30 3
Габаритные размеры, мм - длина - ширина - высота	8370 2475 2845
Маркировка взрывозащиты	I Mb с
Масса, кг, не более	10000

Управление баром осуществляется с рабочего места машиниста, расположенного на комбайне типа КРП-3-660/1140. При движении бункера в сцепке с комбайном допускается не применять гидравлический способ поворота колес. При этом тяга должна быть зафиксирована с рамой с помощью фиксатора.

К раме моста на болтах крепятся два кронштейна с отверстиями для крепления к раме промежуточной конвейера. Конструкция позволяет изменять клиренс кузова бункера и обеспечивает более рациональное использование его в различных горно-геологических условиях.

Исполнительный орган состоит из редуктора исполнительного органа с приводом от электродвигателя и цепного бара (режущего органа).

Цепной бар (орган режущий) состоит из режущей цепи, направляющей рамы, коренного бруса, головки бара и натяжного устройства. В головке бара имеется утюг, по которому перемещается цепь, а также продольный паз, для натяжного устройства, состоящего из винта и гайки.

Заводка бара осуществляется посредством гидроцилиндра, корпус которого шарнирно установлен в проушине корпуса редуктора, а шток – в проушинах седла. При выдвижении гидроцилиндра происходит поворот седла и закрепленного на нем бара относительно оси ведущей звездочки.

Электрическая схема бункера предусматривает работу бункера в автоматическом и ручном режимах управления. Ручной режим предназначен для настройки и наладки бункера, он осуществляется с поста управления комбайнового комплекса.

В ручном режиме управления производятся следующие операции:

- при полной загрузке приемной части бункера и отсутствии вагона отключить работу комбайна;

- после отъезда вагона включить в работу комбайн;

- процесс загрузки бункера повторить.

В автоматическом режиме работы все операции по загрузке руды производятся автоматически.

В конце смены производится внешний осмотр бункера, очистка от пыли и грязи компонентов электро-, гидрооборудования, информационно-указательных табличек и подготовка для передачи другой смене.

Расчет бункера-перегрузателя. Для определения оптимальных параметров бункера-перегрузателя нужно выполнить математическое моделирование процесса его работы. Необходимо стремиться к такому сочетанию параметров, при котором загрузка последующего транспортного средства производилась бы с минимальным количеством циклов, желательно за один проход транспортирующего элемента по желобу перегружателя. В качестве критерия оптимальности выбираемых параметров бункера-перегрузателя принята производительность за чистое время погрузки Q , м³/с:

$$Q = B_{\text{п}} \cdot H_{\text{сл}} \cdot v \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $B_{\text{п}}$ – ширина бункера-перегрузателя, м;

v – скорость транспортирующего элемента, м/с;

$H_{\text{сл}}$ – высота слоя материала в бункере, м:

$$H_{\text{сл}} = 0,5h_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{ж}}$ – высота желоба, м:

$$h_{\text{ж}} = \frac{B_{\text{ж}}}{k_h}, \quad (3)$$

где $B_{\text{ж}}$ – ширина желоба, м;

k_h – коэффициент высоты желоба, $k_h = 2,4 \dots 4,5$.

Максимальный объем материала в бункере-перегрузателе, м³:

$$V_{\text{max}} = B_{\text{п}} H_{\text{сл}} L, \quad (4)$$

где L – длина бункера-перегрузателя, м.

Максимальная длина перегружателя, обеспечивающая неразрывность грузопотока, определяется из соотношения (5):

$$R = F_{\text{тр}} \leq F_{\text{тр.м}}. \quad (5)$$

Данное выражение подразумевает состояние исследуемой системы, при котором объем погружаемого материала перемещается по перегружателю непрерывным потоком. То есть состояние, когда сила на перемещение материала R равна силе трения $F_{\text{тр}}$ и не превышает силу, соответствующую предельному напряженному состоянию штабеля $F_{\text{тр.м}}$, которая зависит от физико-механических свойств транспортируемого материала, в том числе, от угла внутреннего трения, коэффициента трения погружаемого материала по желобу перегружателя $\mu_{\text{тр}}$ и коэффициента внутреннего трения транспортируемого материала $\mu_{\text{тр.м}}$.

Со стороны транспортирующего элемента на призму выпирания материала, находящегося в предельно-напряженном состоянии, в поверхности скольжения возникают кулоновские силы: сила трения грунта по грунту F_1 , сила сцепления грунта $F_{\text{сц}}$ и нормальная сила N .

Силы сцепления образуются при слипании частиц материала. Эти силы превращают глину и грунт в камнеподобное тело при уменьшении влаги.

Таким образом, физическое свойство сцепления присуще материалам, в составе которых имеется соответствующее количество мельчайших частиц, которые при увлажнении превращаются в цементобразное тело, придающее связность более крупным частицам. Этими свойствами не обладают полезные ископаемые в горной промышленности, а также щебень и галька. Сыпучие материалы при малой влажности обладают незначительным сцеплением, поэтому в расчетах силы сцепления не учитываются [5].

Коэффициент трения скольжения материала по стали $\mu_{\text{тр}}$ равен тангенсу угла скольжения φ_0 материалов по стальной поверхности, значение которого обычно не превышает 40° . Поэтому коэффициент $\mu_{\text{тр}}$ в реальных условиях изменяется в пределах $\mu_{\text{тр}} = 0,3 \div 0,84$ [5]. Коэффициент внутреннего трения транспортируемого материала определяется выражением (6):

$$\mu_{\text{тр}} = \text{tg } \varphi_0. \quad (6)$$

После ряда преобразований получим следующую исходную систему уравнений (7):

$$\begin{cases} F_{\text{тр}} = B_{\text{п}} H_{\text{сл}} L \rho g \mu_{\text{тр}}; \\ F_{\text{тр.м}} = S_{\text{пр}} (\cos \varphi_0 \cdot \mu_{\text{тр.м}} + \sin \varphi_0) B_{\text{п}} \rho g / \cos \varphi_0, \end{cases} \quad (7)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Объем погружаемого материала перемещается по желобу непрерывным потоком, при неизменной высоте слоя $H_{\text{сл}}$, совпадающей по величине с высотой транспортирующего элемента. В этом случае площадь призмы выпирания погружаемого материала $S_{\text{пр}}$ можно определить по формуле (8):

$$S_{\text{пр}} = \frac{H_{\text{сл}}^2 \text{ctg } \varphi_0}{2}. \quad (8)$$

Из этой системы следует исходное уравнение (9):

$$B_{\text{п}} H_{\text{сл}} L \rho g \mu_{\text{тр}} \leq S_{\text{пр}} (\cos \varphi_0 \cdot \mu_{\text{тр.м}} + \sin \varphi_0) \cdot \frac{B_{\text{п}} \rho g}{\cos \varphi_0}. \quad (9)$$

После сокращения равных параметров, входящих в обе части уравнения, получим следующее выражение для определения допустимой длины бункера-перегружателя:

$$L \leq \frac{S_{\text{пр}} (\cos \varphi_0 \cdot \mu_{\text{тр.м}} + \sin \varphi_0)}{\cos \varphi_0} \cdot H_{\text{сл}} \cdot \mu_{\text{тр}}.$$

Определение основных параметров барового органа, установленного на бункер-перегрузатель. Длина бара определяется зависимостью (10):

$$L_6 = \frac{H_{\text{ш}} + H_{\text{п}}}{\cos \beta}, \quad (10)$$

где $H_{\text{ш}}$ – глубина прорезаемой щели, $H_{\text{ш}} = 1,38$ м;

$H_{\text{п}}$ – минимальная высота приводного вала режущей цепи над уровнем грунта, $H_{\text{п}} = 0,6$ м;

β – угол наклона бара к вертикали, $\beta = 40^\circ$.

Ширина реза определяется по формуле (11):

$$b = \frac{B_{\text{ш}}}{n_{\text{л}}}, \quad (11)$$

где $B_{\text{ш}}$ – ширина прорезаемой щели, $B_{\text{ш}} = 0,14$ м;

$n_{\text{л}}$ – число линий резания, $n_{\text{л}} = 9$.

Толщина реза (стружки) определяется выражением (12):

$$h = \frac{S_{\text{ср}}}{b}, \quad (12)$$

где $S_{\text{ср}}$ – средняя величина сечения среза, $S_{\text{ср}} = 0,0002 \dots 0,00035$ м².

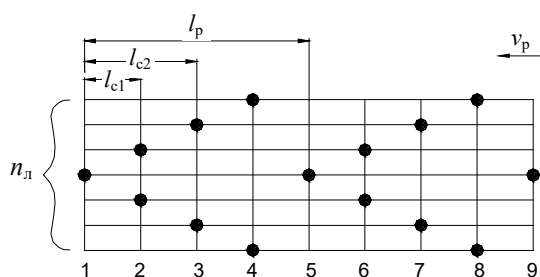
При длине бара $L_6 = 2$ м длина цепи – $L_{\text{ц}} = 5,244$ м.

Количество кулачков в цепи определяется по формуле (13):

$$z_{\text{к}} = \frac{L_{\text{ц}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (13)$$

где $t_{\text{ц}}$ – шаг цепи, $t_{\text{ц}} = 0,076$ м.

Наибольшее распространение получила схема расстановки резцов на исполнительном органе – симметричная «елочка» (рисунок 4).



l_p – расстояние между зубками в одной линии резания; l_{c1}, l_{c2} – расстояние между соседними зубками

Рисунок 4. – Схема расстановки зубков баровой цепи

Количество режущих зубков $z_{\text{л}}$ на одной линии резания определяется из уравнения (14). Как видно из рисунка 4, на каждой линии резания зубок устанавливается через 3 кулачка на 4. Тогда:

$$z_{\text{л}} = \frac{z_{\text{к}}}{4}. \quad (14)$$

Скорость резания (цепи) составляет $v_p = 5,2$ м/с.

Тогда рабочая скорость передвижения машины определяется из (15):

$$v_{\text{р.п}} = \frac{3600 z_{\text{л}} v_p h \cos \beta}{n_{\text{л}} t_{\text{ц}} z_{\text{к}}}, \text{ м/ч.} \quad (15)$$

Заключение. Для безопасного ведения горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» на глубинах свыше 800 м требуется продолжение проведения научных исследований для оценки интенсивности деформационных процессов в окружающих выработки породах, разработка новых машин для проходки выработок, обеспечивающих

возможность и безопасность ведения горных работ. Изготовление опытного образца бункера-перегрузателя БП-14ВБ и его испытание является первым шагом в разработке новых технологических и технических решений по проходке, поддержанию и креплению горных выработок.

Установка барового исполнительного органа на бункер-перегрузатель обеспечивает сокращение времени от проходки выработки до проведения компенсационных щелей, что обеспечивает безопасность ведения работ.

Список использованных источников

1. Прушак, В.Я. Крепление горных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких горизонтов калийного месторождения / В.Я. Прушак, А.Л. Поляков // Актуальные вопросы машиноведения. – 2016. – В. 5. – С. 316-321.
2. Машины врубовые баровые МВБ-140, МВБ-140Э: руководство по эксплуатации ПКАБ 01.21.00.00.000 РЭ. – Солигорск, 2019.
3. Тройнич, В.А. Создание новых машин для проходки горных выработок на рудниках ОАО «Беларуськалий» на глубинах свыше 800 м / В.А. Тройнич, А.П. Дворник, А.В. Брижевич // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 15-27.
4. Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний: ГОСТ 12.1.011-78 (МЭК 79-1 А, 79-4). – Введ. 01.07.79. – Гос. комитет СССР по стандартам. – 23 с.
5. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования: ГОСТ 30852.0-2002 (МЭК 60079-0:1998). – Введ. 15.02.14. – М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. – 50 с.

Информация об авторах

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

Дмитрий Валерьевич Гридюшко – магистр технических наук, аспирант Белорусского национального технического университета, директор, ООО «Завод Бургормаш» (ул. Коммунальная, 3, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: gridushko@burgormash.by.

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

Information about the authors

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

Dzmitry Valerievich Hrydziushka – Master of Engineering Sciences, Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, director of LLC “Plant Burgormash” (3, Communal Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: gridushko@burgormash.by.

Aliaksandr Vladzimiravich Bryzhevich – Master of Engineering Sciences, Post-graduate Student, Belarusian National Technical University, Deputy Director 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.

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

УДК 622.232.83:622.243.56.054(045)

Г.А. Басалай*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОДНОМОТОРНОГО ПРИВОДА
СООСНЫХ РОТОРОВ ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА**

Аннотация. Разработана динамическая модель двух вариантов одномоторного привода соосных роторов проходческого комбайна типа КРП-3 с использованием в первой части привода двухступенчатого цилиндрического редуктора или двухступенчатого планетарного редуктора. Сформированы основные абстрактные элементы, наделенные определенными физическими свойствами: инерционные элементы, способные накапливать кинетическую энергию; упругие элементы, способные накапливать потенциальную энергию; диссипативные элементы, отображающие свойства рассеивания энергии; трансформаторные элементы, отображающие безынерционные преобразования параметров потока энергии, осуществляемые техническими устройствами. В динамических системах исполнительных органов сформулированы внешние воздействия типа потенциала, соответствующие активным моментам двигателя и реактивным нагрузкам на соосные роторы.

Ключевые слова: проходческий комбайн, соосные роторы, привод, динамическая модель.

R.A. Basalai*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***SINGLE-MOTOR DRIVE DYNAMIC MODEL OF COAXIAL ROTORS
OF ROAD HEADING MACHINE**

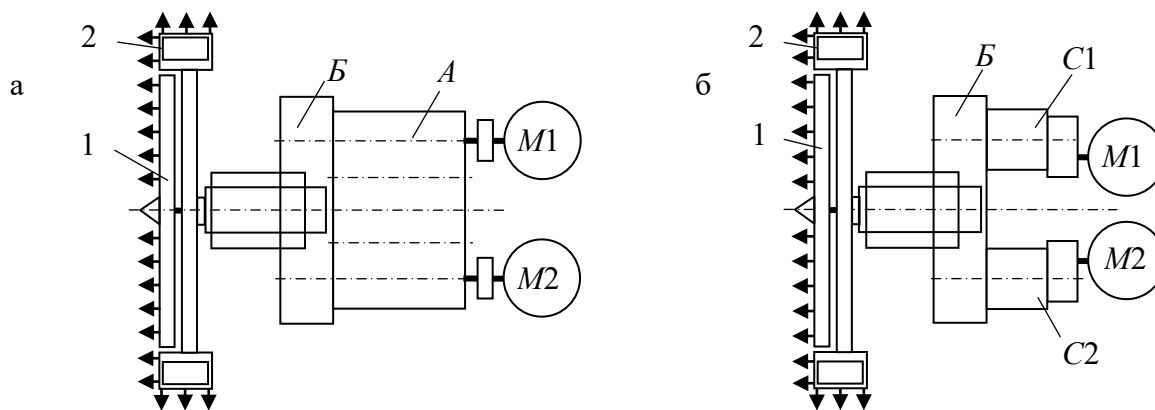
Abstract. A dynamic model of two variants of the single-motor drive of coaxial rotors of road heading machine of the KRP-3 type was developed using two-stage helical gearbox or two-stage planetary gearbox in the first part of the drive. The main abstract elements endowed with certain physical properties are formed: inertial elements capable of accumulating kinetic energy; elastic elements capable of accumulating potential energy; dissipative elements displaying energy dissipation properties; transformer elements displaying inertialless transformations of energy flow parameters carried out by technical devices. In dynamic systems of actuating elements the external actions of the potential type are formulated, corresponding to the active moments of the engine and reactive loadings on the coaxial rotors.

Keywords: road heading machine, coaxial rotors, drive, dynamic model.

Введение. Проходческие комбайны с соосными роторами широко применяются на рудниках при разработке пластовых месторождений калийных солей [1, 2]. Они обеспечивают проходку подготовительных выработок арочной формы при формировании шахтных полей для отработки плодородных пластов очистными комплексами. Фрезерование массива горных пород осуществляется соосными роторами, бермовыми фрезами и отрезными коронками. Из-за напластования фрезеруемых пород сильвинита и галита, имеющих значительную разницу в прочностных свойствах, приводы исполнительных органов подвержены значительным динамическим нагрузкам. В связи с этим, задачи модернизации конструкций и методов проектного расчета приводов исполнительных органов проходческих комбайнов актуальны и в настоящее время.

Цель работы – разработка перспективных одномоторных приводов соосных роторов проходческого комбайна и их анализ на основе динамических моделей.

1. Анализ двухмоторных приводов соосных роторов проходческих комбайнов. Проходческие комбайны типа ПК-8МА и ПКС-8М имеют одноступенчатые приводы соосных роторов. Привод основного органа разрушения (соосных роторов) – электро-механический и осуществляется от двух двигателей мощностью по 110 кВт каждый. Они включают в себя два кинематически последовательно соединенных редуктора. Структурные кинематические схемы приводов приведены на рисунке 1.

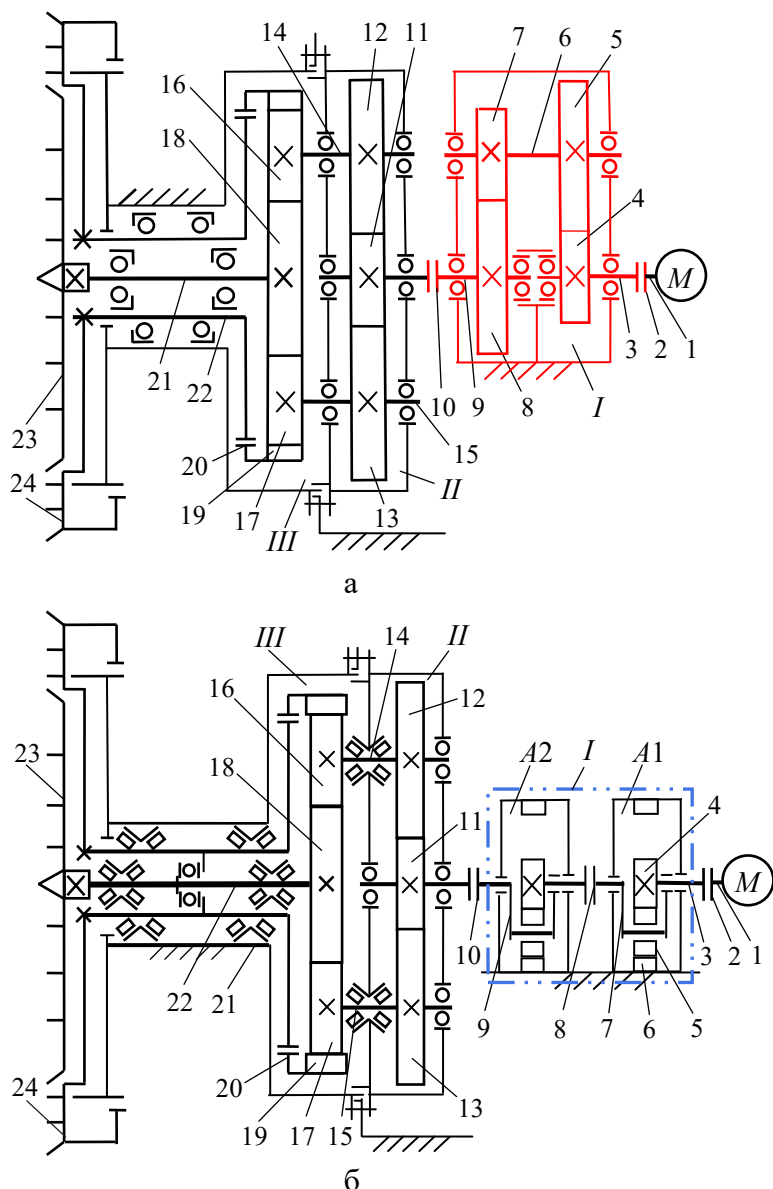


а – привод соосных роторов ПКС-8; б – привод соосных роторов КРП-3;
1 – центральный ротор; 2 – ковшовая рама;
А, Б, С1, С2 – агрегаты трансмиссии привода соосных роторов 1 и 2
Рисунок 1. – Структурные кинематические схемы привода соосных роторов проходческих комбайнов

Первый из них (рисунок 1а) представляет собой спаренный, двухпоточный, цилиндрический, четырехступенчатый редуктор *А* с двумя ведущими и двумя ведомыми валами, приводимый в действие от двух электродвигателей *М1*, *М2* по 110 кВт. Вторым – суммирующе-распределительный одноступенчатый цилиндрический редуктор *Б* приводится в действие двумя параллельными потоками вращающих моментов от зубчатых колес, установленных консольно на ведомых валах первого редуктора. На консолях ведомых соосных валов второго редуктора закреплены основные фрезерующе-погрузочные исполнительные органы комбайна: центральный ротор 1 и ковшовая рама 2. Встречное вращение соосных валов с центральным ротором и ковшовой рамой обеспечивает значительную стабилизацию суммарного реактивного момента на корпус комбайна от сил сопротивления фрезерованию массива горной породы и погрузки горной массы на конвейер [3, 4].

В приводе (рисунок 1б) соосных роторов проходческого комбайна нового поколения типа КРП-3 вместо спаренного, двухпоточного, цилиндрического, четырехступенчатого редуктора *А*, *Б* по предыдущей схеме (рисунок 1а) разработаны и успешно используются два унифицированных между собой модуля *С1*, *С2*, собранные в отдельных корпусах, каждый из которых состоит из соединенных последовательно одной ступени цилиндрической передачи и двух ступеней планетарных передач.

2. Варианты модернизации приводов соосных роторов и их динамическая модель. Рассмотренные выше варианты двухмоторных приводов соосных роторов имеют большие габариты, а также низкий КПД. Наиболее перспективной следует признать схему одномоторного привода соосных роторов (рисунок 2), отличающуюся высоким КПД, простотой и модульностью конструкции, удобством сборки и обслуживания в стесненных условиях подземных выработок.



а – первая часть выполнена в виде двухступенчатого соосного цилиндрического редуктора;

б – первая часть выполнена в виде двухступенчатого планетарного редуктора

Рисунок 2. – Кинематические схемы одномоторного привода соосных роторов

электродвигателя и ведущий вал 3 первой части, а также ведомый вал 9 первой части и вал-шестерня 11 второй части соединены муфтами 2 и 10.

Принципиальная отличительная особенность второго варианта (рисунок 2б) одномоторного привода соосных роторов от первого (рисунок 2а) состоит в том, что в нем первая часть *I* редуктора выполнена в виде двухступенчатого планетарного редуктора. Каждая из планетарных передач *A1*, *A2* включает в себя посаженное на валу 3 центральное зубчатое колесо 4, сателлиты 5, неподвижный зубчатый венец 6 и водило 7. Соединение ведущего вала 3 с валом 1 электродвигателя, а также водила 7 первой ступени *A1* планетарной передачи с ведущим валом аналогичной по конструктивной схеме вто-

Привод (рисунок 2а) [5] содержит электродвигатель, два соосных вала 21 и 22 внутреннего и внешнего роторов 23 и 24, а также редуктор, кинематически связывающий электродвигатель с валом 21 внутреннего ротора 23 через центральное зубчатое колесо 18 и с валом 22 внешнего ротора 24 через колесо внутреннего зацепления 19, выполненное заодно с обоймой зубчатой муфты 20. Редуктор выполнен разъемным и состоит из трех частей, установленных последовательно. Первая часть *I* представляет собой двухступенчатый цилиндрический редуктор с соосными ведущим и ведомым валами, вторая часть *II* – раздаточный цилиндрический редуктор с вал-шестерней 11, находящейся в зацеплении одновременно с двумя одинаковыми, симметрично расположенными зубчатыми колесами 12 и 13, посаженными на ведомых валах 14 и 15, на консоли каждого из которых со стороны третьей части *III* редуктора закреплены шестерни 16 и 17, входящие в зацепление одновременно с центральным зубчатым колесом 18 и с колесом внутреннего зацепления 19, выполненным заодно с обоймой зубчатой муфты 20. Вал 1

рой ступени планетарной передачи $A2$, соответственно водила 9 с валом ведущей шестерни 11 второй части II редуктора обеспечивается муфтами 2, 8 и 10.

Как отмечалось в работе [6] исполнительные органы в сборе с электромеханическими приводами проходческих комбайнов типа ПК-8, ПКС-8 и КРП-3, а также одно-моторный привод [5] относятся к многомерным динамическим системам, состоящим из большого числа взаимодействующих между собой и с внешней средой элементов. Математические модели таких систем – модели макроуровня. Объект исследования в модели макроуровня представляется как динамическая система с сосредоточенными параметрами, описываемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Унифицированная динамическая модель трансмиссии исполнительных органов комбайнов формировалась на основе принципиальных кинематических схем и сборочных чертежей на вышерассмотренные одномоторные приводы с учетом скоростей вращения двигателя ω_{m1} и соосных роторов ω_{p1}, ω_{p2} .

Разработка динамической модели привода исполнительного органа, как абстрактного графического отображения основных физических свойств технического объекта и характеристик взаимодействия с внешней средой, осуществлялась с применением метода сосредоточенных масс. При этом, выделялись некоторые абстрактные элементы, наделенные определенными физическими свойствами: инерционные элементы $J_{m1}, J_1 - J_7, J_{p1}, J_{p2}$, способные накапливать кинетическую энергию; упругие элементы $c_1 - c_8$, обладающие способностью накапливать потенциальную энергию; диссипативные элементы $\mu_1 - \mu_8$, отображающие свойства рассеивания энергии; трансформаторные элементы $U_1, \eta_1 - U_4, \eta_4$, отображающие безынерционные преобразования параметров потока энергии, осуществляемые техническими устройствами, называемыми трансформаторами.

На динамическую систему исполнительного органа действуют внешние воздействия типа потенциала: M_{m1}, M_{p1}, M_{p2} – внешние воздействия, соответствующие моментам двигателя и соосных роторов.

Унифицированная динамическая модель двух вариантов перспективных одномоторных приводов соосных роторов проходческого комбайна представлена на рисунке 3.

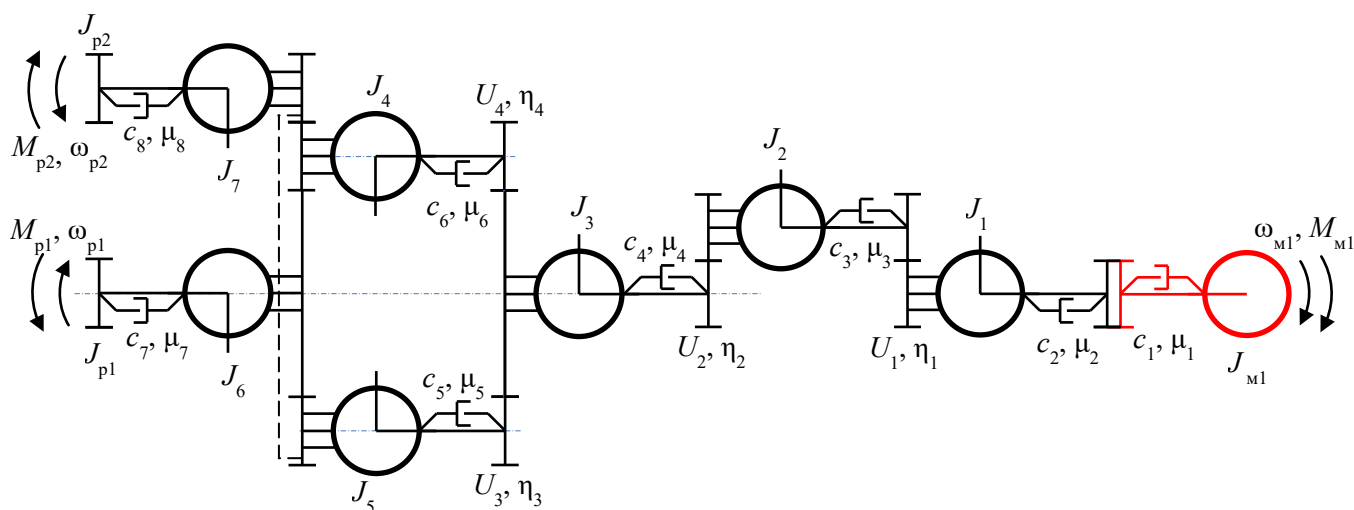


Рисунок 3. – Динамическая модель одномоторного привода соосных роторов проходческого комбайна

На основании динамической модели структурно-матричным методом, подробно описанном в [7], в настоящее время формируется математическая модель в виде систем компонентных и топологических уравнений.

Вывод.

1. Двухмоторные приводы соосных роторов имеют большие габариты, а также низкий КПД. Перспективными следует признать схемы одномоторного привода соосных роторов, отличающегося высоким КПД, простотой и модульностью конструкции, удобством сборки и обслуживания в стесненных условиях подземных выработок.

2. Разработанная универсальная динамическая модель одномоторного привода соосных роторов проходческого комбайна позволяет формировать математическую модель в виде систем компонентных и топологических уравнений.

Список использованных источников

1. Горные машины: учебное пособие: в 2 ч. / под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Вышэйшая школа, 2018. – Ч. 2: Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г.В. Казаченко, В.Я. Прушак, Г.А. Басалай. – 2018. – 228 с.

2. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В.А. Данилов [и др.]; под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Тэхналогія, 2010. – 175 с.

3. Казаченко, Г.В. Горные машины. Практикум: учебное пособие / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Г.И. Лютко. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 200 с.

4. Басалай, Г.А. Анализ работы ковшового погрузочного устройства проходческого комбайна / Г.А. Басалай // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XVI МНТК «Чтения памяти Р.В. Кубачека», проведенной в рамках Уральской промышленной декады, Екатеринбург, 12-13 апреля 2018 г. / Уральский государственный горный университет; под общ. ред. Ю.А. Лагуновой. – Екатеринбург, 2018. – С. 20-23.

5. Привод исполнительного органа проходческого комбайна: пат. 14177 Респ. Беларусь, МПК E21C31/00 / Г.А. Басалай, Э.М. Детков, Е.И. Зубрицкий, И.А. Конопляник, В.В. Романеня; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № а 20090121; заявл. 30.01.09; опубл. 30.04.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001. – № 2 (79). – С. 110-111.

6. Басалай, Г.А. Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3 / Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 2. – С. 84-88.

7. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем: учебник / В.П. Тарасик. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2016. – 591 с.

Информация об авторе

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

Information about the author

Ryhor Antonavich Basalai – Senior Lecturer of the “Mining machinery” Department, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: rbasalai@bntu.by.

Поступила в редакцию 24.08.2021 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 625.8.032:544.722.132(045)

А.А. Поддубный, В.В. Петрусевич, П.А. Кацубо*УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОФОБНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ
ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПОСРЕДСТВОМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ**

Аннотация. В статье рассмотрены методы измерения краевого угла смачивания. Для проведения исследования выбран метод лежащей капли. Используя данный метод, измерения выполнялись на чистых и обработанных гидрофобным составом для профилактической обработки асфальтобетонных образцах, а также на образцах из термопласткомпозита. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что гидрофобный состав для профилактической обработки, а также наличие добавки полипропилена в термопласткомпозит влияют на значения краевого угла смачивания.

Ключевые слова: краевой угол смачивания, керны из асфальтобетонной смеси, термопласткомпозит, гидрофобная композиция для профилактической обработки.

A.A. Poddubny, V.V. Petrusevich, P.A. Katsubo*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***CHANGE ASSESSMENT IN HYDROPHOBICITY OF THE SURFACE
OF ROAD MATERIALS BY MEANS OF DETERMINATION
THE LIMITING WETTING ANGLE**

Abstract. The article discusses measuring methods of limiting wetting angle. Sessile drop method was chosen for the study. Using this method, measurements were carried out on clean and treated with hydrophobic composition for protective treatment asphalt-concrete samples, as well as on the samples from black sheet metal. Research findings suggested that the hydrophobic composition for protective treatment, as well as the polypropylene addition presence in the black sheet metal affects the limiting wetting angle values.

Keywords: limiting wetting angle, core-sample from bitumen-concrete mixture, black sheet metal, hydrophobic composition for protective treatment.

Введение. Необходимость определения величины адгезионного взаимодействия между компонентами композиционных дорожно-строительных материалов представляет собой важную задачу для качественной и количественной оценки их физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств.

Одним из критериев оценки адгезии является величина краевого угла смачивания в системе «минеральный материал – связующее».

Известен ряд методов измерения краевого угла смачивания: по профилю пузырька; по давлению газа, компенсирующему капиллярное давление (для пористых твердых тел и капилляров); по скорости капиллярного поднятия (также для пористых твердых тел и капилляров); метод прямой пластины (метод Вильгельми); метод на-

клонной пластины; по величине капель; по профилю капли [1-3]. Последний способ наиболее прост в аппаратном оформлении, не требует знания поверхностного натяжения жидкости, однако представляет определенные технические проблемы в случае хорошего смачивания поверхности.

В данной работе проведено исследование краевого угла смачивания по методу лежащей капли на чистых и обработанных асфальтобетонных образцах гидрофобным составом для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [4] и на образцах из термопласткомпозита [5].

Методы и материалы исследований. В работе для определения краевых углов смачивания исследуемых образцов использовался комплекс устройств, рассмотренный в работе [6], структурная схема которого приведена на рисунке 1.

Он состоит из столика 2, на котором расположен исследуемый образец 1, устройства формирования капли 3, оптической системы, включающей цифровой фотоаппарат 4, связанный с компьютером 5, и источника света 6. Результаты измерений обрабатываются при помощи персонального компьютера.

В качестве исследуемых образцов для испытаний использовали 6 кернов из асфальтобетонной смеси типа *Б* согласно СТБ 1566-2005 [7], пять из которых обрабатывали гидрофобным составом для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Также в качестве исследуемых образцов использовали 6 цилиндров из термопласткомпозита диаметром ($71,4 \pm 0,1$) мм и высотой ($71,4 \pm 0,1$) мм, которые получали методом прессования в стальной форме согласно [8]. Образцы формовали под давлением 6,0 МПа.

Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог готовили путем совмещения навесок исходных компонентов в лабораторном лопастном смесителе в течение 30 минут при температуре 20 °С. Обработку пяти образцов выполняли следующими вариантами гидрофобного состава для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог [9] (таблица 1).

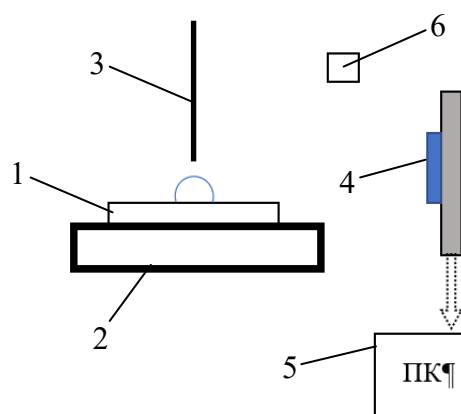


Рисунок 1. – Схема комплекса устройств для определения краевого угла смачивания

Таблица 1. – Составы композиций

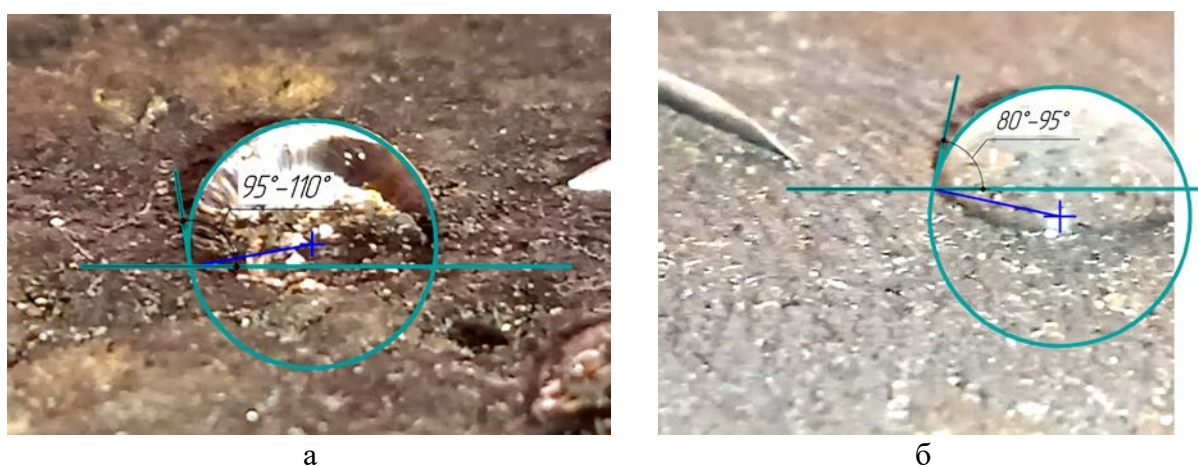
Компонент	№ варианта состава				
	1	2	3	4	5
Связующее (шлам от очистки резервуаров), мас. %	55	60	65	70	80
Минеральный наполнитель, мас. %	16	14	12	10	0
Растворитель, мас. %	19	16	13	10	10
Гидрофобизатор, мас. %	10	10	10	10	10

Образцы из термопласткомпозита следующих рецептур, мас. %:

- образцы № 1-3: песок – 52, полиэтилен высокого давления (ПЭВД) – 47, углерод технический (УТ) – 1;

- образцы № 4-6: песок – 52, полиэтилен высокого давления – 42, полипропилен (ПП) – 5, углерод технический – 1.

Проведение исследований и обсуждение результатов. При выполнении измерений выполняли следующие действия: на столик устанавливали исследуемый образец (чистый или обработанный), после чего на его поверхность при помощи устройства формирования капли (шприц с иглой, внутренний диаметр которой 0,1 мм) наносили жидкость (дистиллированная вода), которая имитирует атмосферные осадки. Затем каплю освещали и профиль ее фиксировали при помощи цифровой камеры ($\times 10$), связанной с компьютером (рисунок 2).



а – керн из асфальтобетонной смеси, обработанный профилактическим составом;

б – образец из термопласткомпозита

Рисунок 2. – Фотографии капли на поверхности

По полученному изображению, которое увеличивалось до нужного размера, определяли параметры капли, необходимые для расчета краевого угла смачивания. Измерения проводили, используя программу *CorelDraw*. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Анализ результатов исследований позволяет утверждать, что гидрофобный состав для профилактической обработки влияет на значения краевого угла смачивания. Лучшие показатели наблюдаются при использовании варианта состава № 2 и № 3, вследствие оптимального распределения на поверхности материала. У варианта № 1 показатель хуже ввиду неравномерности покрытия из-за избытка керосина, который испаряется со временем. Также стоит отметить, что повышается гидрофобность поверхности материала у обработанных образцов гидрофобным профилактическим составом, краевой угол смачивания этих образцов выше на 6-19° в сравнении с чистым образцом.

Анализ полученных результатов исследований образцов из термопласткомпозитов показывает, что композиции на основе ПЭВД (образцы № 1-3) имеют больший краевой угол смачивания, по сравнению с композицией (образцы № 4-6), в состав которой включен полипропилен. Такое положение обусловлено недостаточной совместимостью ПЭВД и ПП в процессе переработки, что приводит к фибрилляции компонентов

смеси и формированию неоднородности композиционной системы и, как следствие, к уменьшению размера и количества пор в композите.

Таблица 2. – Результаты испытаний

Компонент		Значение краевого угла смачивания по результатам испытаний, град.					Средне-арифметическое значение краевого угла смачивания, град.
		№ испытания					
		1	2	3	4	5	
Керны из асфальтобетонной смеси типа <i>Б</i>							
Образец 1 (обработан вариантом состава № 1, согласно таблице 1)		95	92	96	93	96	94,4
Образец 2 (обработан вариантом № 2)		105	101	103	107	103	103,8
Образец 3 (обработан вариантом № 3)		110	107	103	108	109	107,4
Образец 4 (обработан вариантом № 4)		97	99	100	101	99	99,2
Образец 5 (обработан вариантом № 5)		96	97	96	99	95	96,6
Образец 6 (чистый)		90	88	85	89	89	88,2
Образцы из термопласткомпозита							
Образец 1	мас. %: песок – 52; ПЭВД – 47; УТ – 1	93	92	91	94	93	92,6
Образец 2		89	91	92	93	92	91,4
Образец 3		94	93	94	95	94	94
Образец 4	мас. %: песок – 52; ПЭВД – 42; ПП – 5; УТ – 1	83	82	83	84	83	83
Образец 5		86	87	85	88	85	86,2
Образец 6		80	83	84	82	81	82

Выводы. Представленные в работе результаты экспериментальных исследований позволили количественно оценить влияние рецептуры гидрофобного состава для профилактической обработки и термопласткомпозитов на значения краевого угла смачивания.

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

- гидрофобный состав для профилактической обработки влияет на значения краевого угла смачивания;
- повышается гидрофобность поверхности материала у обработанных образцов гидрофобным профилактическим составом, краевой угол смачивания этих образцов выше на 6-19° в сравнении с чистым;
- добавка полипропилен в термопласткомпозит снижает краевой угол смачивания.

Список использованных источников

1. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей / А. Адамсон. – М.: Мир, 1979. – 568 с.
2. Определение краевого угла в капиллярно-пористых материалах / П.А. Витязь [и др.] // Заводская лаборатория. – 1985. – № 4. – С. 53-55.
3. Метод определения краевого угла смачивания в пористых порошковых материалах / П.А. Витязь [и др.] // Порошковая металлургия. – 1986. – № 4. – С. 52-55.
4. Гидрофобный состав для профилактической обработки асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: заявка на патент Респ. Беларусь № а 20180114; МПК7 C08L95/00, C09D195/00, C09K3/18, E01H10/00 / Д.И. Бочкарев, В.В. Петрусевич;

заявитель Д.И. Бочкарев, В.В. Петрусевиц. – № а 20180114; заявл. 23.03.18; опубл. 30.10.19 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019. – № 5. – С. 20.

5. Оценка физико-механических свойств термопласткомпози́тов для их применения в технологических процессах строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог / Д.И. Бочкарев [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. – 2019. – № 2. – С. 44-48.

6. Киселев, М.Г. Определение краевого угла смачивания на плоских поверхностях / М.Г. Киселев, В.В. Савич, Т.П. Павич // Вестник БНТУ. – 2006. – № 1. – С. 38-41.

7. Автомобильные дороги. Методы испытаний: СТБ 1566-2005. – Введ. 01.09.11. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2011. – 19 с.

8. Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Методы испытаний: СТБ-1115-2013. – Введ. 01.10.13. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2014. – 40 с.

9. Подбор оптимального состава профилактической обработки и анализ его влияния на физико-механические свойства материалов асфальтобетонных покрытий / В.В. Петрусевиц // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 2. – С. 73-77.

Информация об авторах

Information about the authors

Алексей Алексеевич Поддубный – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник военно-транспортного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Aleksey Alekseyevich Poddubny – Candidate of Physico-mathematical sciences, Associate Professor, Head of the Military Transport Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., Gomel, 246653, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Вадим Владимирович Петрусевиц – магистр технических наук, преподаватель военно-транспортного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Vadim Vladimirovich Petrusevich – Master of Engineering sciences, lecturer of the Military Transport Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., Gomel, 246653, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Павел Андреевич Кацубо – преподаватель военно-транспортного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

Pavel Andreevich Katsubo – lecturer of the Military Transport Faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., Gomel, 246653, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 23.06.2021 г.

УДК 625.142.21

В.И. Инютин¹, С.С. Кожедуб¹, М.А. Краснов¹, В.М. Шаповалов²¹УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь²ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Аннотация. Надежная работа бесстыкового пути зависит от контроля за угоном рельсовых плетей. Контроль угона плетей осуществляется с помощью устройства «маячных» шпал, в которых используются подрельсовые прокладки с низким коэффициентом трения. Предлагается использовать композиционные материалы на основе вторичного сырья для изготовления подрельсовых прокладок на «маячные» шпалы.

Ключевые слова: бесстыковой путь, подрельсовая прокладка, композиционный материал.

V.I. Iniutin¹, S.S. Kozhedub¹, M.A. Krasnov¹, V.M. Shapovalov²¹Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus²The State Scientific Institution "V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus" Gomel, Belarus**MODIFYING ADDITIVE IMPACT STUDY ON COMPOSITE MATERIAL
SERVICE CHARACTERISTICS**

Abstract. Reliable operation of the continuous welded railway track depends on monitoring the creeping of rail bars. The monitoring of the rail bar creeping is carried out with the device of "guide" railway sleepers, which use low-friction rail pads. It is proposed to use composite materials based on secondary raw materials for the manufacture of rail pads for "guide" railway sleepers.

Keywords: continuous welded railway track, rail pad, composite material.

Введение. Бесстыковой путь широко эксплуатируется на главных и станционных путях сети железных дорог. Преимущество бесстыкового пути заключается в ликвидации рельсовых стыков на протяжении рельсовых плетей, что снижает затраты на текущее содержание пути. Экономия достигается также на ремонте и содержании подвижного состава. Снижаются расходы на тягу из-за уменьшения удельного сопротивления движению, улучшается комфортабельность езды пассажиров и снижается уровень шума в вагонах [1, 2].

Контроль за угоном рельсовых плетей осуществляется по смещению контрольных сечений рельсовой плети относительно «маячных» шпал. Эти сечения отмечают поперечными полосами шириной 10 мм, наносимыми при помощи трафаретов несмываемой светлой (белой) краской на подкладку поверхности подошвы и шейки рельсов внутри колеи в створе с боковой гранью подкладки подкладочных креплений. На участках с загрязнением рельсовых плетей внутри колеи разрешается наносить риски с наружной стороны колеи.

Независимо от конструкции креплений резиновые или резинокордовые подрельсовые прокладки на «маячных» шпалах заменяются полиэтиленовыми или други-

ми с низким коэффициентом трения [3]. При низких температурах эксплуатации фенолформальдегидные полимеры (ФФП), характеризующиеся высокой степенью сшивки связующего, обладают малоцикловой фрикционной усталостью и высоким износом. Известно, что модификация ФФП несшивающимися олигомерами, например, сложными эфирами высших спиртов, позволяет повысить ударную вязкость, деформативность, эластичность и сопротивление усталостному изнашиванию связующего. Установлено, что повышение износостойкости фенолформальдегидных композитов достигается при армировании их полиакрилонитрильными волокнами (ПАН-волокнами). В значительно меньшей степени изучено влияние сухих смазок, полиэфирных смол, минеральных структурирующих веществ и армирующих наполнителей на износостойкость и физико-механические свойства ФФП.

В связи с этим представляло интерес исследовать влияние модифицирующих добавок на основе полиэфирной смолы в присутствии оксинитрата алюминия, графита и метазина, а также отходов на основе кожевенно-обувных производств на эксплуатационные свойства композиционного материала.

Экспериментальная часть. В качестве связующего применяли фенолформальдегидную смолу, модифицированную полиэфирной смолой ПН-1 в качестве армирующей добавки, использовали органические волокна в виде отходов полиакрильных волокон. В композицию вводили дисперсный наполнитель оксинитрат алюминия, графит и метазин [4]. Для снижения жесткости и повышения упругих свойств прокладок использовали композиционный материал на основе кожевенно-обувных производств: обрезь юфти, кожи хромовой и микропористую резину [5]. Физико-механические характеристики образцов материала определяли по соответствующим ГОСТ.

Исследования проводили методом центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка. В качестве параметров оптимизации были выбраны интенсивность линейного изнашивания (Y_1, I) и коэффициент трения (Y_2, f) композиционного материала, а в качестве факторов – содержание в связующем ненасыщенной полиэфирной смолы ПН-1 (X_1, C_1), оксинитрата алюминия (X_2, C_2), метазина (X_3, C_3), графита (X_4, C_4) и ПАН-волокон (X_5, C_5). Материалы на основном уровне варьирования содержали: $C_1 = 10 \pm 4$ мас. ч.; $C_2 = 15 \pm 5$ мас. ч.; $C_3 = 5 \pm 2$ мас. ч.; $C_4 = 30 \pm 5$ мас. ч.; $C_5 = 30 \pm 10$ мас. ч. на 100 мас. ч. фенолформальдегидной смолы.

Фрикционные испытания композиционных материалов при различных скоростях и нагрузках осуществляли на машине трения МИ-1М по методу «вал - частичный вкладыш». Для этого из пластин материала толщиной 10 мм вырезали частичные вкладыши с радиусом углубления 40 мм и длиной 20 мм. В качестве контртела использовали ролик, изготовленный из стали 45, рабочую поверхность которого подвергали закалке и шлифовке. Исследование поверхности контртела производили на профилографе-профилометре «Калибр БСЭ». Температуру образца в зоне трения регистрировали хромель-копелевой термопарой на 0,5 мм от поверхности трения. Нагружение частичных вкладышей производили с помощью рычажного устройства. Определение величины линейного износа осуществляли по потере веса путем вычислений, основанных на предположении, что износ происходит равномерно по поверхности трения. Линейная характеристика износа представляет собой высоту изношенного слоя, приходящегося на единицу пути трения. Линейный износ рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{Q}{S \gamma L \cdot 10^8}, \quad (1)$$

где Q – весовой износ, мг;

S – площадь поверхности трения, см²;

γ – удельный вес материала, г/см³;

L – путь трения, км.

Ударную вязкость образцов определяли по ГОСТ 4647. Изнашивание образцов осуществляли при нагрузке 1,0 МПа и скорости относительного скольжения 0,5 м/с при трении без смазочного материала.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Получены регрессионные уравнения, отражающие влияние ингредиентов на интенсивность линейного изнашивания (2) и коэффициент трения (3):

$$\begin{aligned} Y_1 \cdot 10^9 = & 3,736 + 1,373X_1 - 0,903X_2 + 0,748X_3 - 0,028X_4 - 0,399X_5 + \\ & + 0,238X_1X_2 + 0,371X_1X_3 - 1,391X_1X_4 + 0,649X_1X_5 - 0,985X_2X_3 + \\ & + 0,626X_2X_4 + 0,272X_2X_5 + 0,902X_3X_4 + 1,535X_3X_5 - 0,037X_4X_5 + \\ & + 0,893X_1^2 + 1,732X_2^2 + 0,353X_3^2 + 0,272X_4^2 + 1,904X_5^2; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Y_2 \cdot 10 = & 4,864 + 0,1026X_1 - 0,1912X_2 - 0,0724X_3 - 0,1396X_4 - 0,059X_5 - \\ & - 0,0781X_1X_2 + 0,3615X_1X_3 - 0,1293X_1X_4 + 0,1748X_1X_5 - 0,0944X_2X_3 - \\ & - 0,1069X_2X_4 - 0,0365X_2X_5 + 0,0096X_3X_4 + 0,0761X_3X_5 - 0,0469X_4X_5 - \\ & - 0,2198X_1^2 - 0,1769X_2^2 - 0,3285X_3^2 - 0,3064X_4^2 - 0,3273X_5^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Проверку адекватности полученных математических моделей осуществляли по критерию Фишера ($F_T = 4,95$). Экспериментальные значения критериев Фишера и допустимые интервалы коэффициентов для уравнений регрессии равны:

- для уравнения (2) – $F_3 = 4,25$; $\Delta b_i = 0,0225$; $\Delta b_{ii} = 0,0204$; $\Delta b_{ij} = 0,0276$;
- для уравнения (3) – $F_3 = 11,97$; $\Delta b_i = 0,016$; $\Delta b_{ii} = 0,0145$; $\Delta b_{ij} = 0,0196$.

Из сравнения экспериментальных и табличных значений критериев Фишера видно, что уравнение (2) представляет собой адекватную, а уравнение (3) – близкую к адекватной математические модели композиционного материала.

С учетом значимости коэффициентов и после перехода к натуральным переменным уравнения (2), (3) принимают вид (4), (5):

$$\begin{aligned} I \cdot 10^9 = & 70,5093 + 0,4164C_1 - 2,7999C_2 - 4,062C_3 - 0,767C_4 - 1,7877C_5 + \\ & + 0,0119C_1C_2 + 0,0464C_1C_3 - 0,0696C_1C_4 + 0,0162C_1C_5 - 0,0985C_2C_3 + \\ & + 0,025C_2C_4 + 0,0054C_2C_5 + 0,0902C_3C_4 + 0,0768C_3C_5 - 0,0007C_4C_5 + \\ & + 0,0558C_1^2 + 0,0693C_2^2 + 0,0883C_3^2 + 0,0109C_4^2 + 0,019C_5^2; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f \cdot 10 = & 36,811 + 0,0795C_1 + 0,3324C_2 + 0,0794C_3 + 0,7299C_4 + 0,1669C_5 + \\ & + 0,3905 \cdot 10^{-2} C_1C_2 + 4,5188 \cdot 10^2 C_1C_3 - 0,649 \cdot 10^2 C_1C_4 + 0,437 \cdot 10^2 C_1C_5 - \\ & - 0,944 \cdot 10^2 C_2C_3 - 0,4276 \cdot 10^2 C_2C_4 - 0,73 \cdot 10^2 C_2C_5 + 0,98 \cdot 10^3 C_3C_4 + \\ & + 3,805 \cdot 10^3 C_3C_5 - 0,938 \cdot 10^3 C_4C_5 - 13,7375 \cdot 10^3 C_1^2 - 7,076 \cdot 10^3 C_2^2 - \\ & - 82,125 \cdot 10^3 C_3^2 - 12,256 \cdot 10^3 C_4^2 - 3,273 \cdot 10^3 C_5^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ уравнения (2) показывает, что наибольшее влияние на снижение интенсивности изнашивания композиционного материала оказывает содержание в связующем ненасыщенной полиэфирной смолы и графита, а также оксинитрата алюминия и метазина, представляющего собой смесь метиловых эфиров оксиметильных производ-

ных меламин. Это можно объяснить тем, что как ненасыщенная полиэфирная смола и метазин, так и продукты их взаимодействия с графитом и оксинитратом алюминия способствуют формированию на сопряженных поверхностях адгезионноспособных пластичных пленок переноса, обладающих низким сопротивлением сдвигу.

Так как срок службы подрельсовых прокладок определяется преимущественно скоростью изнашивания антифрикционного элемента, то оптимизацию состава материала осуществляли по минимуму функции (2). В результате обработки уравнения (2) установили, что минимальная расчетная интенсивность изнашивания – $I = 8,451 \cdot 10^{-10}$. Таким образом, при возрастании концентрации ПАН-волокон интенсивность изнашивания композиционного материала достигает минимального значения при содержании полиакрилонитрильных волокон 30 мас. ч. При этом содержание оксинитрата алюминия в композиции должно быть более 20 мас. ч. (рисунок 1). Композит оптимального

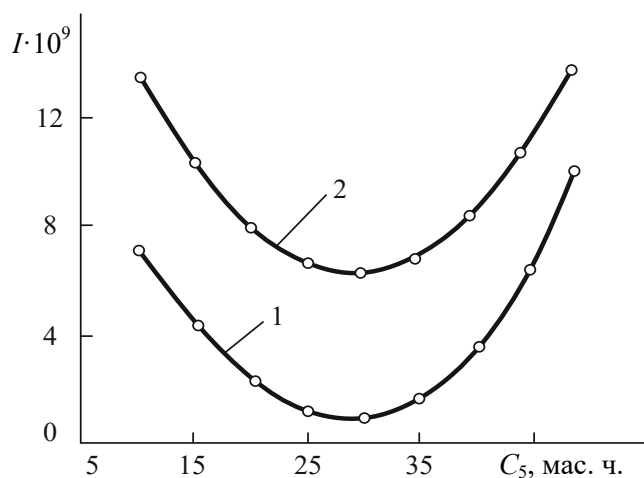


Рисунок 1. – Зависимость интенсивности изнашивания фенолформальдегидного полимера, содержащего 6 мас. ч. ненасыщенной полиэфирной смолы, 25 мас. ч. графита, 7 мас. ч. метазина от концентрации ПАН-волокон C_5 : 1 – 20 мас. ч., 2 – 10 мас. ч. оксинитрата алюминия

состава можно характеризовать следующими показателями: разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_{сж} = 107,6...122,7$ МПа; твердость НВ = 236...307 МПа; коэффициент трения 0,16-0,23.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что модифицирование фенолформальдегидных полимеров ненасыщенными полиэфирными смолами, оксинитратом алюминия, сухими смазками и ПАН-волокнами позволяет получить армированные композиты с регулируемыми триботехническими и физико-механическими характеристиками.

Снижение жесткости и повышение упругих свойств достигалось использованием композици-

онного материала на основе вторичного полиэтилена, наполненного отходами кожевенно-обувных производств. Для разработки методом математического планирования 2-го порядка экспериментов исследовали влияние добавок измельченных отходов кожи хромовой (X_1 ; C_1), юфти (X_2 ; C_2) и резиновой крошки (X_3 ; C_3) на интенсивность изнашивания I_1 и ударную вязкость a (кДж/м²) композиционного материала на основе отходов вторичного полиэтилена.

Исходные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Исходные данные эксперимента

Уровни и интервал варьирования	Содержание ингредиентов, мас. ч.		
	C_1	C_2	C_3
верхний уровень	20,00	75,00	90,00
нулевой уровень	15,00	50,00	60,00
нижний уровень	10,00	25,00	30,00
интервал варьирования	5,000	25,00	30,00

План эксперимента и обработки данных приведен в таблице 2. Были получены уравнения регрессии, отражающие влияние концентрации компонентов на интенсивность изнашивания (6) и ударную вязкость (7) композита.

Таблица 2. – План и результаты эксперимента

Матрица планирования			Результаты испытаний (10^9)			
X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}$
1,000	1,000	1,000	2,194	2,180	2,159	2,178
-1,000	1,000	1,000	2,026	2,106	2,020	2,051
1,000	-1,000	1,000	1,848	1,844	1,843	1,845
-1,000	-1,000	1,000	1,638	1,646	1,621	1,635
1,000	1,000	-1,000	1,507	1,507	1,457	1,490
-1,000	1,000	-1,000	1,433	1,434	1,444	1,437
1,000	-1,000	-1,000	1,348	1,406	1,395	1,383
-1,000	-1,000	-1,000	1,239	1,245	1,256	1,247
1,682	0,000	0,000	1,610	1,677	1,660	1,649
0,000	1,682	0,000	1,899	1,926	1,877	1,900
0,000	0,000	1,682	2,241	2,185	2,144	2,190
-1,682	0,000	0,000	1,444	1,397	1,430	1,424
0,000	-1,682	0,000	1,461	1,428	1,421	1,437
0,000	0,000	-1,682	1,302	1,275	1,326	1,301
0,000	0,000	0,000	1,583	1,559	1,548	1,563
0,000	0,000	0,000	1,556	1,598	1,567	1,574
0,000	0,000	0,000	1,504	1,589	1,531	1,541
0,000	0,000	0,000	1,554	1,554	1,554	1,554
0,000	0,000	0,000	1,532	1,530	1,541	1,534
0,000	0,000	0,000	1,546	1,569	1,540	1,552

Уравнение регрессии для интенсивности линейного изнашивания I в кодированных переменных (6):

$$Y_1 \cdot 10^9 = 1,553 + 0,06629X_1 + 0,1338X_2 + 0,2671X_3 - 0,0208X_1X_2 + 0,01851X_1X_3 + 0,05633X_2X_3 - 0,005431X_1^2 + 0,04137X_2^2 + 0,06864X_3^2. \quad (6)$$

Допустимые интервалы коэффициентов для уравнения регрессии (6) для $b_0 = 0,1785$, для $b_i = 0,1183$, для $b_{ij} = 0,1547$, для $b_{ii} = 0,1153$, $F_T = 5,050$, $F_3 = 0,2510$.

Так как $F_T > F_3$, то уравнение регрессии (6) адекватное.

После перехода к натуральным переменным уравнение (6) принимает вид (7):

$$Y \cdot 10^9 = 1,298 + 0,008718C_1 - 0,04526C_2 - 0,00493C_3 - 0,00008323C_1C_2 + 0,00006169C_1C_3 + 0,00007510C_2C_3 - 0,00005431C_1^2 + 0,00006619C_2^2 + 0,00007627C_3^2. \quad (7)$$

Анализ уравнения (6) показывает, что при малых концентрациях кожи хромовой и юфти поверхность отклика интенсивности изнашивания проходит через минимум (рисунок 2). Приведенные исследования показали, что коэффициент трения составляет 0,1-0,12.

Допустимые интервалы коэффициентов для уравнения регрессии (7) для $b_0 = 2,720$, для $b_i = 1,803$, для $b_{ij} = 2,357$, для $b_{ii} = 1,757$, $F_T = 5,050$, $F_3 = 0,2418$.

Для уравнения (8) $F_T > F_3$, следовательно, уравнение (7) адекватное.

Уравнение регрессии ударной вязкости в кодированных переменных (8):

$$Y_{10} = 245,9 + 0,7533X_1 - 50,85X_2 - 6,257X_3 - 0,138X_1X_2 - 1,411X_1X_3 - 5,011X_2X_3 - 3,947X_1^2 + 10,58X_2^2 - 2,615X_3^2. \quad (8)$$

После перехода к натуральным переменным уравнение (8) принимает вид (9):

$$Y_{10} = 357,3 + 1,569C_1 - 3,318C_2 + 0,5447C_3 - 0,0005521C_1C_2 - 0,004702C_1C_3 - 0,006681C_2C_3 - 0,0395C_1^2 + 0,01693C_2^2 - 0,002906C_3^2. \quad (9)$$

Графический анализ уравнения (8) показал, что при повышении концентрации кожи хромовой и резиновой крошки поверхность отклика ударной вязкости проходит через максимум, приведенный на рисунке 3.

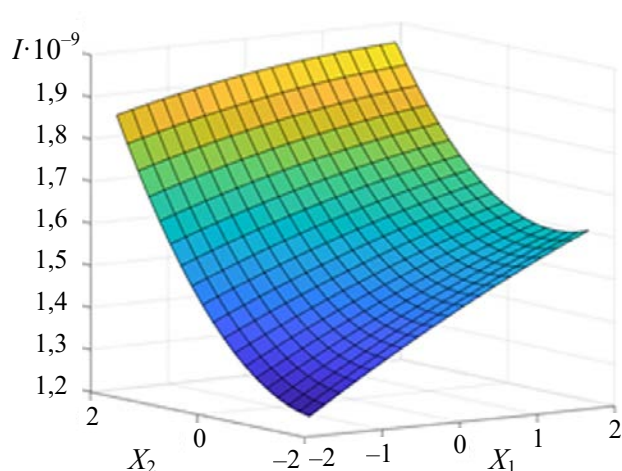


Рисунок 2. – Зависимость интенсивности изнашивания I композита от содержания кожи хромовой X_1 и юфти X_2

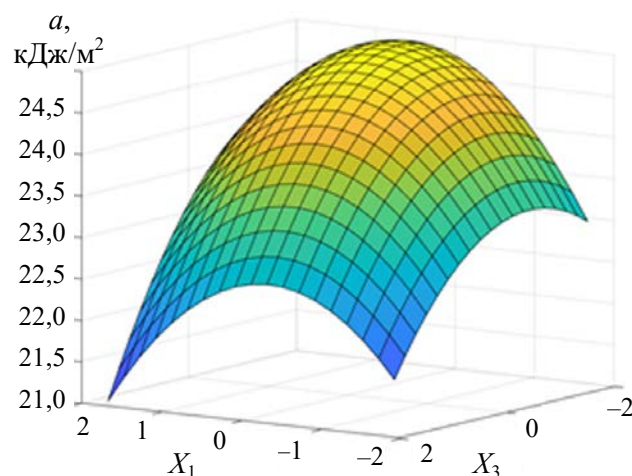


Рисунок 3. – Зависимость ударной вязкости a композита от содержания кожи хромовой X_1 и резиновой крошки X_3

Заключение. В результате анализа проведенных исследований и аналитических зависимостей установлено, что модифицирование фенолформальдегидного композиционного материала полиэфирной смолой в присутствии оксинитрата алюминия, графита и метазина обеспечивает повышение износостойкости композиционного материала на 57 %, в особенности с использованием вторичных полиакрилонитрильных волокон. Применение композиционного материала на основе вторичного полиэтилена, наполненного отходами кожевенно-обувных производств, способствует снижению жесткости и повышению (на 70 %) упругих свойств прокладок. Из разработанных материалов изготовлены подрельсовые прокладки, уложенные на «маячные» шпалы для контроля продольного перемещения рельсовых плетей бесстыкового пути.

Список использованных источников

1. Новакович, В.И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями: учеб. пособие / В.И. Новакович // Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2001. – 92 с.
2. Крейнис, З.Л. Бесстыковой путь: учеб. пособие // З.Л. Крейнис, Н.Е. Селезнева. – М.: Транспорт, 2005. – 125 с.

3. Бесстыковой путь, устройство, укладка, содержание и ремонт: СТП БЧ 56.269-2013 (с изм. № 1 1375НЗ от 31.12.2014): стандарт организации, разработанный БЖД. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 115 с.

4. Инютин, В.И. Подрельсовые прокладки для «маячных» шпал / В.И. Инютин, С.С. Кожедуб, А.А. Кирьянова // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию БИИЖТа-БелГУТа, Гомель, 11-12 окт. 2018 г. / УО «Белорусский государственный университет транспорта». – Гомель, 2018. – С. 26-28.

5. Инютин, В.И. Разработка технологии переработки вторичного сырья в путевые прокладки / В.И. Инютин, С.С. Кожедуб, А.А. Кирьянова // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию БИИЖТа-БелГУТа, Гомель, 11-12 окт. 2018 г. / УО «Белорусский государственный университет транспорта». – Гомель, 2018. – С. 166-168.

Информация об авторах

Information about the authors

Владимир Иванович Инютин – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: sed@bsut.by.

Vladimir Ivanovich Iniutin – Ph. D. in Engineering sciences, Associate Professor of the “Design, construction and operation of transport vehicles” Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: sed@bsut.by.

Сергей Сергеевич Кожедуб – старший преподаватель кафедры «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных объектов», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: sed@bsut.by.

Sergej Sergeevich Kozhedub – Senior Lecturer of the “Design, construction and operation of transport vehicles” Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: sed@bsut.by.

Марк Алексеевич Краснов – студент строительного факультета, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: sed@bsut.by.

Mark Alekseevich Krasnov – student of construction faculty, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: sed@bsut.by.

Виктор Михайлович Шаповалов – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом № 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси» (ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь), e-mail: mpri@mail.ru.

Victor Mihailovich Shapovalov – D.Sc. in Engineering sciences, Professor, Head of the Department No. 1 “Composite materials and recycling of polymers”, The State Scientific Institution “V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus” (32a, Kirova Str., 246050, Gomel, Belarus), e-mail: mpri@mail.ru.

Поступила в редакцию 02.06.2021 г.

УДК 678.5.011-416:615.285.7.026.1(045)

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

Аннотация. Разработаны многофункциональные инсектицидные пленочные материалы на основе полиэтилена высокого давления путем модифицирования полимерной матрицы химически активными реагентами – инсектицидами из классов синтетических пиретроидов, фосфорорганических соединений, неоникотиноидов; дисперсными частицами карбоната кальция; УФ-абсорбентом из класса гидроксibenзофенонов. Установлено, что равномерное распределение частиц карбоната кальция в смеси с гранулами полиэтилена высокого давления позволяет равномерно распределить малое количество добавок в связующем. Молекулы инсектицида, находящиеся в рыхлой структуре частиц CaCO_3 , сохраняют свою подвижность и способность к испарению.

Ключевые слова: инсектициды, полимерные композиционные материалы, гидроксibenзофеноны, микробиологическая активность, кератинсодержащие изделия.

E.V. Lashkina*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***INSECTICIDAL POLYMER FILM MODIFIED WITH FUNCTIONAL FILLERS**

Abstract. Multifunctional insecticidal film materials based on high-pressure polyethylene have been developed by modifying the polymer matrix with chemically active reagents-insecticides from the classes of synthetic pyrethroids, organophosphates, and neonicotinoids; dispersed parts of calcium carbonate; and UV-absorbent from the class of hydroxybenzophenones. It was found that the uniform distribution of calcium carbonate particles in the mixture with HDPE granules allows for the uniform distribution of a small amount of additives in the binder. Insecticide molecules located in the loose structure of CaCO_3 particles retain their mobility and evaporability.

Keywords: insecticides, polymer composite materials, hydroxybenzophenones, microbiological activity, keratin-containing products.

Введение. Значимость индустрии упаковки в мировой экономической инфраструктуре продолжает возрастать с каждым годом. Полимерные пленки занимают лидирующие позиции в мире среди различных материалов, поскольку сохраняют высокое качество упакованных в них товаров в течение длительного срока, имеют минимальную массу, толщину, стоимость.

Рынок упаковочных материалов ощущает острую потребность в качественной, недорогой и экологически безопасной отечественной упаковке, конкурентоспособной по отношению к зарубежным аналогам.

Актуальным является разработка упаковочных полимерных материалов нового поколения, выполняющих не только барьерную защиту непродовольственных товаров (шерстяных тканей, одежды, пушно-меховых полуфабрикатов и изделий, утепления для обуви, мебели и т.п.) от неблагоприятного воздействия окружающей среды и механических повреждений, но и активно влияющих на свойства товара и способствующих сохранению его экономической и потребительской ценности.

Одной из современных тенденций в области разработки способов защиты лесных, сельскохозяйственных угодий и декоративных насаждений в городах от насеко-

мых-фитофагов, а также сырья и промышленных товаров от биоповреждений является их упаковка и/или укутывание с помощью многофункциональных полимерных пленок.

Известна инсектицидная композиция, содержащая полимерное связующее на основе полипропилена и аддукт (продукт, полученный в результате реакций присоединения) на основе пиретроида, ПАВ и винилфосфата (стабилизатор связующего, антиоксидант). В такой композиции отсутствует компонент, позволяющий равномерно распределять малое количество модификаторов (инсектицид и антиоксидант) в связующем. Пленка имеет невысокую стойкость к окислению на воздухе, вследствие неоптимального распределения в полимерном связующем антиоксиданта [1].

Одним из способов воздействия на численность летающих насекомых, получившим широкое использование, является применение пиретроидных инсектицидных препаратов фумигационного действия [2]. Эффективность данных препаратов достигается только при нагревании их до температуры 130-160 °С.

Огромный опыт применения инсектицидов накоплен в сельском хозяйстве. Самодиспергирующийся инсектицидный и инсектоакарицидный препарат [3] представляет собой суспензию, содержащую синтетический пиретроид, стабилизатор, поверхностно-активное и клеящее вещество.

В настоящее время основными средствами борьбы с биоагентами являются химические препараты – инсектициды, которые относятся к различным классам соединений и отличаются по своей структуре, действию на различные виды членистоногих, скоростью и характером метаболизма в организме, продолжительностью остаточного действия и избирательной токсичностью.

Значительное изменение имеющихся свойств инсектицида и придание ему новых характеристик возможно за счет введения модифицирующих добавок, которые изменяют эксплуатационные и технологические свойства, облегчая переработку материала в изделие при снижении производственных затрат [4].

В качестве стабилизатора, повышающего стойкость полиэтиленового связующего к действию УФ-излучения, использовали УФ-абсорбент класса 2-гидроксibenзофенон, мировым лидером по производству которого является Швейцарская компания CIBA (BASF) [5].

Высокая стабилизирующая активность гидроксibenзофенонов обусловлена их многофункциональностью. Они поглощают УФ-излучение, защищая тем самым от него не только упакованные товары, но и саму полимерную упаковку [6].

Для равномерного распределения в полимерной матрице инсектицида и стабилизатора, а также устранения слипания готовой к эксплуатации пленки, снижения износа оборудования, получения новых физико-механических свойств продукции выступил дисперсный порошок карбонат кальция (CaCO_3) [7].

Цель работы – изучение влияния функциональных наполнителей на физико-химические и эксплуатационные свойства инсектицидной полимерной пленки.

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

Активными компонентами в полимерных композиционных материалах были выбраны инсектициды различного спектра действия, обладающие высокой инсектицидной активностью, экологической безопасностью, разрешенные к применению на территории Республики Беларусь [8]:

- синтетический пиретроид – перметрин (торговая марка «Перметрин», вязкая жидкость) – (IRS)-цис, транс-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметилцикло-пропанкарбоновой кислоты 3-феноксibenзиловый эфир, ТУ 113-04-331-91, эмпирическая формула $\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{Cl}_2\text{O}_3$;

- синтетический пиретроид – циперметрин (торговая марка «Шарпей», МЭ) – (IRS)-цис, транс-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметилцикло-пропанкарбоновой кислоты (RS)-3-фенокси- α -цианобензиловый эфир, ТУ 2387-015-45418518-99, эмпирическая формула $C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$;

- синтетический пиретроид – β -циперметрин (торговая марка «Кинмикс», КЭ) – α -циано-3-феноксибензол-3-(2,2-дихлорвинил)-2,2-диметил-циклопропанкарбоксилат, ТУ 2441-061-48811647-2006, эмпирическая формула $C_{22}H_{19}Cl_2NO_3$;

- фосфорорганический инсектицид – пиримифос-метил (торговая марка «Актеллик», КЭ) – 2-диэтиламино-6-метилпиримидин-4-ил диметилфосфат, ТУ 2387-007-00494172-97, эмпирическая формула $C_{11}H_{20}N_3O_3PS$;

- инсектицид класса нионикотиноидов, действующее вещество – имидаклоприд (торговая марка «Искра Золотая», ВРК) – 4,5-дигидро-N-нитро-1-[(6-хлор-3-пиридил)метил]имидазолидин-2-иленамин, ТУ 2387-087-42315284-04.

В качестве пластификатора для улучшения технологических и эксплуатационных свойств был выбран диоктилфталат (ДОФ) $C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$ (ТУ 6-09-08-1504, ГОСТ 8728), обладающий слабым инсектицидным действием.

В композициях использовали УФ-абсорбент – стабилизатор из класса 2-гидрокси-бензофенонов – 2-гидрокси-4-октилоксибензофенон (Chimassorb 81) – светло-желтый кристаллический порошок с коэффициентом пропускания: при $\lambda = 440$ нм не менее 79 %, при $\lambda = 460$ нм не менее 89 % (где λ – длина волны). Chimassorb 81 термодинамически совместим с ПЭВД (интервал температур плавления 47-49 °С), что обуславливает технологичность процесса получения пленки методом рукавно-пленочной экструзии.

Средством равномерного распределения целевых добавок инсектицида и стабилизатора в связующем выступил порошок карбоната кальция $CaCO_3$ дисперсностью менее 500 нм (ГОСТ 17498-72) [6].

Композиции готовили следующим образом: в порошок $CaCO_3$ (до 5 мас. %) последовательно путем смешивания вводили инсектицид (1-2 мас. %), затем стабилизатор Chimassorb 81 (0,5-1 мас. %); смесь пластифицировали жидким ДОФ (2-3 мас. %), интенсифицирующим процесс выделения инсектицида и выполняющим функцию диспергатора в процессе компаундирования минерального наполнителя. Полученную массу смешивали с ПЭВД. Пленки формовали из смесевых композиций методом рукавной экструзии [9].

Технологичность процесса переработки композиций в пленку оценивали с помощью экструзионного агрегата HAAKE RHEOCORD 90 по критерию минимума крутящего момента в шнеке. По соответствию этому критерию определен диапазон оптимальной дисперсности частиц $CaCO_3$ менее 500 нм (ГОСТ Р 56549-2015).

Деформационно-прочностные показатели исследуемых образцов (разрушающее напряжение σ и относительное удлинение ε при разрыве) определяли по ГОСТ 14236-81 с помощью разрывной машины Instron 5567 (США).

Испытания на воздействие солнечной радиации инсектицидных пленок проводили по методу, изложенному в ENISO 4892-2:2011 (Пластмасса. Методы испытаний на воздействие лабораторных источников света. Часть 2. Ксеноновые дуговые лампы). Перед определением деформационно-прочностных характеристик проводили кондиционирование образцов по ГОСТ 12423-66 в течение 6 ч при температуре 23 ± 1 °С. Количество образцов в каждой выборке составило 10 шт.

Для определения термической стабильности полученных инсектицидных композиций был проведен дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический анализ (ТГА), а затем рассчитана энергия активации термоокислительной деструкции E_d :

$$E_d = R \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31 \cdot 10^3$ Дж/кмоль · град.;

α – угол наклона логарифмической зависимости изменения массы от температуры.

Исследования проводили на дериватографе Q-1500 (Венгрия) в среде воздуха при скорости нагрева 5 град./мин. В качестве эталона использовали прокаленный дисперсный оксид алюминия квалификации «ч» (ТУ 6-09-426-75).

Методом ИК-спектроскопии исследовали интенсивность химических и физико-химических взаимодействий внутри полимерной композиции. ИК-спектры образцов исследуемых материалов регистрировали в диапазоне волновых чисел $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ на ИК-Фурье спектрофотометре NICOLET 5700. Идентификацию и анализ полученных спектров осуществляли с использованием имеющихся данных по ИК-спектрам полимеров и органических соединений [10, 11].

Инсектицидное действие пленок изучали относительно личинок комнатных мух (*Musca domestica*). Личинки (по 50 особей) помещали в бюксы на образцы исследуемых пленок. Спустя 5 ч регистрировали число m погибших личинок.

Микробиологическую активность модифицированных пленок исследовали на тест-культурах бактерий *Pseudomonas aeruginosa*, выращенных из паспортизированных штаммов Института микробиологии НАН Беларуси. Культуры микроорганизмов высевали в чашки Петри с мясопептонной питательной средой. В каждую чашку помещали по 3 образца пленок одинакового инсектицидного состава. Площадь образцов 10 мм^2 , масса = 0,07 г. Чашки с образцами выдерживали в термостате при температуре 28 °С и влажности, близкой к 100 %, в течение 7 суток. Регистрировали появление зоны задержки роста микроорганизмов.

Результаты и их обсуждение. УФ-стабилизатор Chimassorb 81 нейтрализует образующиеся при фотоокислении макромолекулы радикалы, в результате чего образуются ингибиторы окисления, при этом еще более увеличивается подвижность молекул инсектицида в матрице ПЭВД, что ускоряет испарение и обуславливает повышенную концентрацию паров инсектицида вблизи поверхности пленки даже при малом содержании инсектицида в составе композиции.

По данным деформационно-прочностных показателей диапазон оптимальных концентраций стабилизатора Chimassorb 81 равен 0,5-1 мас. %. Уменьшение концентрации Chimassorb 81 до 0,2 мас. % приводит к снижению деформационно-прочностных показателей пленок в процессе старения (таблица 1). А увеличение содержания в пленке до 1,2 мас. % не дает преимуществ по сравнению с пленками оптимальных составов. Область оптимальных концентраций ПЭВД соответствует 90-92 % [12]. По данным деформационно-прочностных показателей область оптимальных концентраций CaCO_3 составляет 4-5 мас. % [12]. Дальнейшее увеличение содержания CaCO_3 приводит к снижению этих показателей, что обусловлено уменьшением содержания ПЭВД и повышением дефектности материала, влияющей на изменение его структуры и, соответственно, на снижение деформационных характеристик и эксплуатационных свойств.

Область оптимальных концентраций инсектицида исследуемых классов составляет 1-2 мас. %. Снижение концентрации инсектицида до 0,5 мас. % существенно снижает инсектицидность пленки – до 73 %. При содержании инсектицида 2,5 мас. % инсектицидная активность пленки такая же, как при содержании 1-2 мас. % и составляет 100 %.

Пластификатор выполняет функции регулятора деформационно-прочностных характеристик пленки и транспортного агента инсектицида в структуре пленки. При содержании ДОФ 1 мас. % существенно ухудшаются деформационные показатели и инсектицидность пленки, при 4 мас. % они такие же, как и в диапазоне оптимальных концентраций ДОФ = 2-3 мас. %.

Таблица 1. – Изменение величины деформационно-прочностных характеристик (разрушающего напряжения при растяжении σ , МПа, и относительного удлинения при разрыве ε , %) модифицированных пленок в процессе светового старения

Исследуемые инсектицидные пленки, состав, мас. %	Время УФ-облучения образцов пленок, мес.							
	0		4		8		12	
	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε
ПЭВД/инсектицид(1)/CaCO ₃ (4)/Chimassorb 81(1)/ДОФ(2)	8,6	390	8,0	390	7,9	390	7,7	380
ПЭВД/инсектицид(1)/CaCO ₃ (4)/ДОФ(2)/Chimassorb 81 (X^*)								
$X = 0,2$	9,8	170	7,82	130	7,36	110	7,12	100
$X = 0,5$	9,6	170	8,34	140	7,62	130	7,49	110
$X = 1$ (перметрин)	10,9	170	10,08	160	9,91	145	9,76	135
$X = 1$ (циперметрин)	10,3	170	9,79	160	9,61	150	9,63	140
$X = 1$ (β -циперметрин)	11,5	160	10,78	150	10,53	140	10,23	130
$X = 1$ (пиримифос-метил)	9,22	190	8,75	180	8,45	160	8,29	145
$X = 1$ (имидаклоприд)	10,8	180	10,11	165	9,91	150	9,76	135
$X = 1,2$	9,82	170	9,28	165	9,02	150	8,63	140
X^* – концентрация стабилизатора Chimassorb 81, мас. %								

Пленки оптимального состава мас. %: ПЭВД (92)/инсектицид (1)/Chimassorb 81 (1)/CaCO₃ (4)/ДОФ (2) отличаются повышенной технологичностью и отсутствием липкости, что упрощает их эксплуатацию.

Результаты ДТА показали, что введение в инсектицидную полимерную пленку частиц CaCO₃ способствует смещению пиков термодеструкции на 10-15 °С в сторону более высоких температур и снижению их интенсивности. Это обусловлено улучшением структуры материала вследствие равномерного распределения частиц дисперсного наполнителя в полимерной матрице.

Кроме того, введение дисперсных частиц минерального наполнителя карбоната кальция в полимерные инсектицидные композиции приводит к увеличению степени кристалличности материалов на 8-12 % и составляет: ПЭВД/перметрин/CaCO₃/Chimassorb 81/ДОФ – 70,26 %, ПЭВД/циперметрин/CaCO₃/Chimassorb 81/ДОФ – 68,31 %, ПЭВД/ β -циперметрин/CaCO₃/Chimassorb 81/ДОФ – 70,54 %, ПЭВД/пиримифос-метил/CaCO₃/Chimassorb 81/ДОФ – 69,63 %, ПЭВД/имидаклоприд/CaCO₃/Chimassorb 81/ДОФ – 70,68 %, что приводит к образованию индивидуальных кристаллических структур за счет протекания физико-механических взаимодействий между компонентами и, как следствие, материал имеет высокую степень кристалличности. Молекулы инсектицида, иммобилизованные в рыхлой структуре частиц CaCO₃, сохраняют свою подвижность и способность к испарению, обеспечивая пролонгированное действие пленки.

Экспериментальные данные и приведенные расчеты позволили оценить термостойкость стабилизированных композиций при нагреве путем определения энергии активации E_d термоокислительной деструкции ПЭВД.

Анализ значений E_d показал, что использование Chimassorb 81 (концентрацией 1 мас. %) приводит к возрастанию энергии активации до 144,9 кДж/моль (нестабилизированный ПЭВД 109,56 кДж/моль) и, как следствие, к повышению термохимической устойчивости и стойкости к термоокислительной деструкции стабилизированных инсектицидных композиций. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности действия данного стабилизатора.

Анализ ИК-спектров полимерной композиции на примере ПЭВД/Перметрин/Chimassorb 81/CaCO₃/ДОФ показал наличие широкой полосы поглощения в области 3406 см⁻¹, которая описывает валентные колебания гидроксильной группы (ОН). При

этом наблюдается смещение полосы поглощения в более высокочастотную область, что является подтверждением образования водородных связей между функциональными группами полимерной композиции.

Значения оптических плотностей полос поглощения композиции ПЭВД/Перметрин/Chimassorb 81/ДОФ до и после введения частиц CaCO_3 приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Оптические плотности полос поглощения инсектицидной композиции ПЭВД/Перметрин/Chimassorb 81/ДОФ до и после введения частиц минерального наполнителя CaCO_3

Оптическая плотность	Полоса поглощения, см^{-1}					
	3400	2965-2945	2880-2860	1735	1532	875
D_0 ПЭВД/Перметрин/Chimassorb 81/ДОФ	0,240	2,945	2,164	0,869	–	–
D ПЭВД/Перметрин/Chimassorb 81/ CaCO_3 /ДОФ	0,416	5,785	5,728	1,246	0,957	0,731
ΔD	0,176	2,840	3,564	0,377	0,957	0,731

Изменение оптических полос поглощения в спектре композиции ПЭВД/ДОФ/инсектицид/Chimassorb 81 после введения порошка карбоната кальция свидетельствует об адсорбции инсектицида и стабилизатора на поверхности частиц карбоната кальция, что позволяет равномерно распределить незначительное количество модифицирующих реагентов в связующем и придать полимерной композиции новые свойства – технологичность, прочность, стойкость к свето- и термодеструкции, высокую инсектицидную активность по отношению к насекомым-кератофагам, длительный срок эксплуатации.

По результатам микробиологических исследований активность всех исследованных образцов по отношению к микроорганизмам не зарегистрирована. Разработанная многофункциональная инсектицидная пленка, модифицированная дисперсными частицами CaCO_3 , не оказывает подавляющего морфологического и физиологического действия на тест-культуры.

Заключение. Введение дисперсных частиц CaCO_3 и стабилизатора из класса гидроксibenзофенонов – Chimassorb 81 – в полимерную пленку на основе ПЭВД, модифицированную инсектицидами классов: синтетические пиретроиды (перметрин, циперметрин, β -циперметрин), фосфорорганические соединения (пиримифос-метил), неоникотиноиды (имidakлоприд), позволяет получить новый многофункциональный инсектицидный полимерный материал, обладающий инсектицидной активностью, стойкостью к воздействию УФ-лучей, длительным сроком эксплуатации.

Разработанные многофункциональные инсектицидные полимерные материалы могут быть рекомендованы в качестве защитной упаковочной пленки для изделий из кератинсодержащих материалов, предотвращающей их повреждение биоагентами при хранении и транспортировке, а также в качестве укрывной пленки пролонгированного действия для защиты сельскохозяйственных и лесных хвойных и лиственных насаждений от насекомых-фитофагов.

Список использованных источников

1. Инсектицидная композиция и изделия, полученные из нее: пат. RU 2463788, МПК A01N53/00, A01N25/10, A01P7/02, A01P7/04 / Эрбен Пьер, Сарторн Габриелла, Ди Пьетро Фабио; заявитель Базелль полиолефине ГМБХ (DE). – № 2009147752/13; заявл. 05.05.08; опубл. 20.10.12 // Федеральный институт промышленной собственности, отделение ВПТБ. – 2012. – Бюл. № 29.

2. Лека, Н.А. Сравнительное контактное и фумигационное действие летучих пиретроидов на насекомых / Н.А. Лека, С.Н. Бендрышева // *Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора*, Пермь, 16-18 мая, 2012 г. / Мин-во здравоохранения и социального развития РФ, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека и др.; под общ. ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко, акад. РАМН Н.В. Зайцевой. – Пермь, 2012. – С. 365-369.

3. Лашкина, Е.В. Разработка многофункциональных полимерных пленок для защиты сельскохозяйственных и лесных угодий от насекомых-фитофагов / Е.В. Лашкина // *ПРИРОДНАЯ СРЕДА ПОЛЕСЬЯ* и устойчивое развитие агропромышленного комплекса региона: VI Междунар. науч. конф., Брест, 12-14 сент. 2012 г. / ГНУ «Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси»; гл. ред. М.В. Михальчук. – Брест, 2012. – Вып. 5. – С. 156-159.

4. Наполнители для модификации современных полимерных композиционных материалов / А.С. Колосова [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 10 (3). – С. 459-465.

5. Стабилизатор для полиолефинов: пат. US 6869992, МПК C08K5/34 / Gugumus Fran. cedilla. ois. (Allschwil, CH); заявитель Ciba Specialty Chemicals Corporation (Tarrytown, NY). – Appl. No. 10/182,073; заявл. 23.07.02; опубли. 22.03.05.

6. Цвайфель, Х. Добавки к полимерам: справочник / Х. Цвайфель, Р.Д. Маер, М. Шил-лер; перевод с англ. под ред. В.Б. Узденского, А.О. Григорова. – СПб.: Профессия, 2016. – 1088 с.

7. Изучение влияния состава неорганического наполнителя на физико-химические свойства полимерного композиционного материала / О.В. Ершова [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12-3. – С. 487-491.

8. Государственный реестр средств защиты растений (пестицидов) и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь // Государственное учреждение «Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений». – Минск: ООО «Земледелие и защита растений», 2020. – 742 с.

9. Современные методы получения полимерных композиционных материалов и изделий из них / А.С. Колосова [и др.] // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2018. – № 8. – С. 123-129.

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

11. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант [и др.]; под ред. Э.Ф. Олейника. – М.: Химия. 1986. – 472 с.

12. Лашкина, Е.В. Исследование физико-химических и эксплуатационных свойств инсектицидных полимерных пленок / Е.В. Лашкина // *Вестник Витебского государственного технологического университета*. – 2020. – № 2 (39). – С. 108-117.

Информация об авторе

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

Information about the author

Elena Vitalievna Lashkina – Senior Lecturer of the “Water Supply, Chemistry and Ecology” Department, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: llashkina@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.06.2021 г.

УДК 614.841.411

Д.Л. Подобед

Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТОВ

Аннотация. Проведен сравнительный анализ современных функциональных добавок для полимерных материалов, влияющих на изменения их специальных свойств, в том числе, и в контексте безопасности жизнедеятельности человека. Изучены свойства базовых полиолефинов и композитов на их основе. Показан характер влияния функциональных добавок на улучшение эксплуатационных свойств базовых полиолефинов и рассмотрены вопросы преодоления сложностей при их введении в полимерную матрицу. Отмечена двойственность свойств получаемых полимерных изделий, приведены способы их оптимизации в комплексе. Проведенный анализ позволяет создавать условия для получения материалов со специальными свойствами (огнестойкость, стойкость к ионизирующему излучению, атмосферостойкость, электростатические свойства и др.), способными повысить безопасность жизнедеятельности человека.

Ключевые слова: термопластичный полимер, функциональная добавка, композиционный полимерный материал, эксплуатационные и технологические свойства композитов, безопасность жизнедеятельности.

D.L. Podobed

*Gomel Branch Establishment of the University of Civil Protection of the Ministry
for Emergency Situations of Belarus, Gomel, Belarus*

THE EFFECT OF FUNCTIONAL ADDITIVES ON SPECIAL PROPERTIES OF THERMOPLASTIC MATERIALS

Abstract. A comparative analysis of modern functional additives for polymer materials that have impact on changes of their special properties, including human vital security, is carried out. The properties of basic polyolefins and composite materials based on them are studied. The impact on improving the service properties of basic polyolefins of functional additives is shown and issues related to overcome difficulties when introducing them into the polymer matrix are considered. The duality of properties of the obtained polymer products is noted, the methods of their optimization in the complex are given. The conducted analysis allows us to create conditions for obtaining materials with special properties (fire-resistance, resistance to ionizing radiation, weather resistance, electrostatic properties, etc.), which can improve human vital security.

Keywords: thermoplastic polymer, functional additive, composite polymer material, service and processing characteristics of composites, vital security.

Введение. Повышение безопасности жизнедеятельности человека во многом определяется использованием безопасных материалов, а соответственно, способствует сохранению здоровья человека и его работоспособности [1]. Полимерные материалы обладают комплексом полезных свойств [2]: малая плотность при значительной прочности; стойкость к агрессивным средам; низкая теплопроводность, хорошие декоративные свойства; легкость их технологической переработки; возможность полной механизации и автоматизации процесса их изготовления; хорошая свариваемость и склеиваемость как между собой, так и с другими материалами (древесиной, металлом и др.). С другой стороны, материалы на их основе имеют высокую горючесть, низкую теплоустойчивость, ползучесть и склонность к их «старению». Поэтому разработка полимерных

материалов со специальными свойствами (огнестойкость, стойкость к ионизирующему излучению, атмосферостойкость, электростатические свойства и др.), которые способствуют повышению безопасности жизнедеятельности человека, требует применения в композиционных системах функциональных добавок, в особенности, для композиционных материалов на основе термопластов. При этом немаловажно, что растущие объемы производства полимеров и их потребления способствуют увеличению полимерных отходов, что приводит к ухудшению экологической обстановки в мире.

Основная часть. Введением добавок можно изменять физико-механические, теплофизические, оптические, электрические, фрикционные и другие эксплуатационные характеристики исходного (базового) полимера [3]. Анализ структуры потребления добавок в мире по их типам свидетельствует, что наибольшее количество добавок в полимерных композитах используют в виде пластификаторов (59 %), антипиренов (12 %), смазки (6 %) и термостабилизаторов (6 %).

Пожарная безопасность является важным аспектом для многих отраслей народного хозяйства, так как способствует стабильности производства и создает условия для сохранения жизни человека как в производственном процессе, так и в бытовых условиях [4]. В то же время практически все материалы склонны к горению, и последствия пожаров приносят как производству, так и личному имуществу огромный вред. Поэтому разработка способов и материалов, обеспечивающих улучшение их пожарной безопасности, представляется всегда актуальной и своевременной задачей. Особо важны показатели горючести для полимерных материалов, используемых на объектах, связанных с большими потоками людей или высокой скоростью перемещения объекта в пространстве, что способствует быстрому распространению возгорания и затрудняет ликвидацию пожара.

Снижения горючести полимерных материалов можно достичь двумя путями. Первый заключается в химической модификации полимерной молекулы путем введения в полимерную цепочку некоторых химических элементов. Примером может служить поливинилхлорид, в макромолекулах которого присутствует хлор. Кислородный индекс ПВХ равен 49. Другим примером может быть политетрафторэтилен (фторопласт-4), имеющий кислородный индекс 95. Для сравнения: кислородный индекс полиэтилена составляет всего 17,4. Другим способом создания полимерных материалов с пониженной горючестью является создание полимерной композиции, имеющей в своем составе антипирены – различные добавки, понижающие горючесть [5].

Одним из эффективных путей устранения этого недостатка является получение полимерных композитов с антипиреновыми добавками [6]. Действие антипиренов основано на изоляции одного (или сразу всех) из источников пламени – тепла, горючего вещества или кислорода. Для защиты изделий из пластмасс обычно используют комбинации разных антипиренов, создающих синергический эффект. При выборе антипирена необходимо учитывать несколько факторов, главные из которых – химическая природа полимера и требования пожарной безопасности. Важным условием являются термостабильность, температура плавления, качество смешения с полимером. Необходимо также учитывать влияние антипирена на прочие свойства композита. Поэтому на эксплуатационные свойства композита влияет равномерность распределения антипирена в композиционной системе.

Для США и Европы рынки потребления антипиренов примерно одинаковы, доля в объеме потребления основных антипиренов приведена в таблице.

В последние годы определено, что применение в промышленности композиционных материалов галогенсодержащих антипиренов приносит вред как окружающей среде, так и человеку. В частности, Европейская Комиссия запретила использование тех антипиренов, которые вредят здоровью людей, безопасности и экологии. Один из

разделов Директивы Европейского Союза (ЕС) указывает на ограничение использования опасных веществ, в том числе, на применение бромированных антипиренов – полибромбифенил и пентабромбифениловый эфир (PBDE) [7].

Таблица. – Потребление антипиренов

Антипирены	Доля в потреблении, %
Бромсодержащие	39
Фосфорсодержащие	23
Неорганические	22
Хлорсодержащие	10
Меламины	6

Важную роль в улучшении качества антипиренов, уменьшении их себестоимости, а также существенном расширении сфер применения играют нанотехнологии, где одним из перспективных направлений получения нанокомпозитных добавок является использование материалов на основе органоглин [8]. Нанокомпозиты «полимер-органоглинозем» характеризуются повышенной термостабильностью и стойкостью к распространению пламени даже при очень низких концентрациях наполнителя. Это вызвано формированием термоизоляции и незначительной проницаемостью обугленного полимера для огня. Сочетания органоглиноземов с другими антипиренами-наполнителями, такими как гидроксид алюминия, имеют многообещающие перспективы [9].

Вспенивающийся графит получают нагреванием образца модифицированного графита, в процессе которого его толщина, как и у вспенивающихся добавок, увеличивается примерно в 100 раз. Слоистая структура графита позволяет внедрять между слоями другие молекулы, например, серную или азотную кислоту. Хотя производители таких материалов заявляют, что при переработке этих антипиренов кислота не выделяется, производители негорючих материалов используют такие добавки в сочетании с карбонатом кальция, поглощающим кислоты. Под воздействием тепла внедренные в графит молекулы кислот разлагаются с выделением газа, за счет чего и происходит вспенивание. Вспенивающийся графит можно использовать для защиты термо- и реактопластов. Обычно его применяют в комбинации с фосфорсодержащими соединениями, оксидами сурьмы или гидроксидами металлов, которые создают подложку для слоя вспененного графита. Недостатками графита, ограничивающими его применение, являются черный цвет и повышенная электропроводность.

Одним из способов снижения горючести полимерного материала является введение в полимер инертных наполнителей, к которым можно отнести минеральные наполнители, устойчивые до температуры 1000 °С – оксиды металлов, фториды кальция и лития, силикаты, технический углерод, неорганическое стекло, порошкообразные металлы и вещества, разлагающиеся при температуре ниже 400-500 °С с поглощением тепла и обычно с выделением углекислого газа и (или) паров воды, аммиака – гидроксиды, карбонаты, гидрокарбонаты, гидрокарбонаты металлов, аммоний фосфаты и т.д. Большой эффект может быть получен введением добавки, разлагающейся с поглощением тепла. Классическим примером такой добавки, одновременно выступающей в роли наполнителя, является гидроксид алюминия $Al(OH)_3$ около 55-65 мас. %. Одним из наиболее эффективных ингибиторов процессов горения полимеров является фосфор и его соединения. Действия фосфорсодержащих антипиренов (замедлителей горения) обычно объясняют следующим образом. При пиролизе полимеров, содержащих соединения фосфора, происходит образование фосфорной кислоты и ее ангидридов, которые катализируют дегидратацию и дегидрирование и способствуют процессу карбонизации. В последнее время стали применять не только низкомолекулярные, но и полимерные

фосфорсодержащие антипирены. Эти полимерные добавки имеют лучшую совместимость с основным полимером, равномерное распределение в нем, меньше мигрируют из полимерного материала. В качестве эффективных антипиренов в последние годы широко применяются оксиды и гидроксиды различных металлов, соли органических и неорганических кислот, хелатные комплексы [10]. Существенным преимуществом этих антипиренов является то, что их можно использовать в концентрациях, намного меньших, чем концентрации фосфора и галогенсодержащих соединений.

Идея защиты материала от огня путем образования на его поверхности коксовой «шапки» возымела ожидаемые перспективы, когда стали разрабатываться и применяться так называемые вспучивающиеся огнезащитные покрытия [11]. Эти покрытия при воздействии огня образуют пористый пенококс, увеличивая толщину в десятки раз. Образующийся кокс, являясь своего рода, с одной стороны, «термошубой», имеет низкую теплопроводность, и какое-то время защищает основной материал или конструкцию от теплового потока, а с другой стороны, является изолятором от окислителя и источников зажигания процессов горения. В то же время перспективными представляются исследования по получению композитов с поверхностным эффектом.

В последние годы интенсивное развитие получило введение антипиреновых добавок в полимерные композиции в виде микрокапсул [12, 13]. Оболочка капсулы изготовлена из полимера, например, из желатина, поливинилового спирта, размеры ее составляют десятки и сотни микрон. Четыреххлористый углерод, тетрафтордибромэтан и др. фреоны-галоидуглеводороды в микрокапсулированном виде намного эффективнее снижают горючесть полимерной композиции, нежели введенные в чистом виде. Оказалось, что жидкость, находящаяся внутри микрокапсул, к моменту их вскрытия подвергается сильному перегреву (на 100-200 °С выше температуры кипения). Устойчивое (метастабильное) перегретое состояние жидкости внутри них обусловлено отсутствием зародышей парообразования. Полимерный материал, содержащий микрокапсулированный эффективный антипирен, такой, например, как тетрафтордибромэтан, может быть не только горючим, но и огнегасящим.

На сегодняшний день во многих сферах жизнедеятельности человека используются различные энергетические установки, в том числе и те установки, при работе которых возможно испускание ионизирующего излучения различной природы. Ионизирующее излучение – это излучение, энергия которого достаточна для ионизации облучаемой среды (например, тканей тела человека). Человек может столкнуться со следующими разновидностями ионизирующего излучения: электромагнитное (рентгеновское и гамма-излучение) и корпускулярное (альфа-излучение, бета-излучение, нейтронное и протонное излучение, позитронное излучение и пр.), а также облучением от радиоактивных газов, таких как радон, торон, актинон (образуются в горных породах и минералах при альфа-распаде естественных радиоизотопов радия). Ионизирующее излучение, в отличие от других видов излучений, к примеру, таких как ультрафиолетовое, световое, инфракрасное, микроволновое, способно вызывать различные физико-химические изменения в клетках организма [14].

В области радиационно-защитного материаловедения используются такие традиционные материалы, как: железосодержащие и вольфрамсодержащие (ослабляют потоки фотонного излучения); свинецсодержащие (ослабляют фотонное излучение); борсодержащие (поглощают тепловые нейтроны); тяжелые и серпентинитовые бетоны; гидриды металлов. Используются также защитные блоки, на основе полиэтилена со специальными добавками для защиты от нейтронного и гамма-излучения [15]. В последнее время были разработаны новые виды материалов, которые состоят из двух и более разнородных компонентов, обладающих различными физико-химическими и механическими свойствами. Такие композиционные материалы проектируются на разных основах: полимерных, бетонных, металлических основах. Это и кремнийсодержащие материалы, по-

лимерные композиционные материалы, материалы на основе термопластичных эластомеров, на основе бетонных и металлических матриц и пр. [3-12]. Многие такие композиционные материалы обладают и радиационно-защитными свойствами. Наполнителями таких радиационно-защитных композитов могут быть органосилоксановые материалы, железорудные породы КМА (на магнетитовой и гематитовой основе), термостойкие нанотрубчатые наполнители, нанопорошки вольфрамата свинца, наполнители на основе стальной и чугунной дроби и пр. [16, 17]. В последнее время интересным и перспективным направлением является разработка новых видов композиционных материалов, на основе металлических алюминиевых матриц и железосодержащих наполнителей.

Статическое электричество может наблюдаться в больших масштабах и вызывать серьезные негативные последствия. Образующаяся искра может привести к пожару или даже взрыву горючих материалов, а также осложнить протекание многих производственных процессов [18]. Статическое электричество заключается в чрезмерном накоплении электрических зарядов на материалах с низкой электропроводностью и большим поверхностным сопротивлением (порядка 10^{14} - 10^{18} Ом). Это касается таких полимерных материалов как: полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полиуретан и поликарбонат. Это явление ограничивает скорость технологического процесса, создает материальные потери, приводит к загрязнению продукта и ускоряет его разложение, в результате чего выделяются токсичные вещества. Электризация может происходить во время переливания жидкости или пересыпания непроводящих сыпучих материалов, размотки с барабана лент или пленок, ходьбы по наэлектризованной поверхности или же снятия одежды. Статическое электричество привело в 1937 году к пожару крупнейшего в истории немецкого дирижабля «Гинденбург».

Антистатические добавки можно разделить на наружные и внутренние [18]. Они отличаются методом применения, механизмом действия, а также временем активности. Наружные антистатические средства наносят на поверхность готового пластика. Время активности этого типа соединений очень короткое, потому что под воздействием механических факторов они подвергаются истиранию. Теряют свою активность уже через 6 недель и в этом отношении намного слабее выглядят на фоне внутренних антистатиков. Совершенно иначе действуют внутренние антистатиканы, которые добавляют в пластик во время его обработки. Через 24-48 часов после процесса экструзии они мигрируют на поверхность материала, создавая гигроскопичную пленку, притягивающую воду. Образовавшийся таким образом слой выполняет проводящую функцию, так как отводит заряд и снижает степень заряженности пластмассы.

В промышленности используются антистатиканы с разной химической структурой. Как правило, среди них выделяют две группы – ионные и неионные добавки. Первая группа рекомендуется для полимеров с относительно высокой полярностью или для пластика. К ионным антистатикам принадлежат: катионные соединения, к которым относятся четвертичные аммониевые соли; анионные соединения – в основном соединения, содержащие фосфор (производные фосфорной кислоты (V), фосфаты (V)), а также соединения, содержащие серу (сульфаты (VI), сульфонаты). Вторую группу представляют неионные добавки. Неионными антистатиками являются амидные производные (алкоксилированные амиды), аминовые производные (алкоксилированные жирные амины) и эфиры глицерина.

Дополнительно антистатиканы придают следующие свойства [18]: гидрофильные и гигроскопические; способность ионизации в воде – наличие ионов повышает проводимость воды; способность миграции к поверхности пластика. Использование антистатических добавок позволяет избежать опасных искровых разрядов, ограничить пыленакопление на предметах, изготовленных из пластика, притягивающее большое количество зарядов.

Полимеры широко используются в электротехнике, электронных приборах, в различном оборудовании, где очень важно иметь материалы, обладающие электропроводностью, электрической прочностью, диэлектрической проницаемостью и др.

Наполнители могут влиять на электропроводность по-разному [19]. Высокое содержание электропроводных наполнителей (металлических порошков, графита) позволяет значительно увеличить электропроводность полимерного материала. Широко используют для получения электропроводных полимерных материалов технический углерод и графит как в виде порошков, так и в виде волокон и тканей. В последнем случае получают электропроводные материалы с высокой прочностью, обладающие анизотропными свойствами.

Электропроводные полимерные материалы широко используются в производстве радиоэкранирующих изделий и оболочек. Радиоэкранирующие свойства таких изделий увеличиваются с ростом электропроводности полимерного материала. Углепластики используются для создания антирадарной авиационной и ракетной техники. Одной из областей применения полимерных материалов с высокими диэлектрическими характеристиками является производство радиопрозрачных материалов для механической защиты радиопередающих устройств [20].

Заключение. Таким образом, современная наука о полимерах позволяет конструировать на их основе материалы с заданными свойствами, используя различные функциональные добавки. Их введение в термопластичные композиционные материалы позволяет создавать условия для получения материалов, обеспечивающих улучшение специальных свойств (огнестойкость, стойкость к ионизирующему излучению, атмосферостойкость, электростатические свойства и др.), что способствует повышению безопасности жизнедеятельности человека, как в производственных условиях, так и в повседневной жизни.

Список использованных источников

1. Казин, Э.М. Основы индивидуального здоровья человека: введение в общую и прикладную валеологию: учеб. пособие / Э.М. Казин, Н.Г. Блинова, Н.А. Литвинова. – М.: Владос, 2000. – 192 с.
2. Шаповалов, В.М. Многокомпонентные полимерные системы на основе вторичных материалов: монография / В.М. Шаповалов, З.Л. Тартаковский. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2003. – 262 с.
3. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы / О.В. Ершова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований [Электронный ресурс]. – 2015. – № 4-1. – С. 14-18. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23213297>. – Дата доступа: 12.05.2021.
4. Бортновский, В.Н. Безопасность жизнедеятельности человека: учеб. пособие / В.Н. Бортновский, И.М. Отрощенко. – М.: Новое знание, 2016. – 205 с.
5. Снижение горючести полимерных материалов / Л.И. Китиева [и др.] // Вестник современной науки. – 2017. – № 2-1 (26). – С. 31-35.
6. Гликштерн, М.В. Антипирены / М.В. Гликштерн // Полимерные материалы. Изделия, оборудования, технологии [Электронный ресурс]. – 2003. – № 4. – С. 21-23. – Режим доступа: <http://polymerbranch.com/31fefc0e570cb3860f2a6d4b38c6490d/e11cc7a2200579306f568ca8dc129d9a/magazineclause.pdf>. – Дата доступа: 12.06.2021.
7. Modified Polypropylene with DBDPE Flame-retardant / Chen Fuhua [et al.] // Plastics Science and Technology [Electronic resource]. – 2004. – № 6. – P. 30-34. – Mode of access: https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotat-SLKJ200406009.htm. – Date of access: 12.05.2021.
8. Наноккомпозиты на основе полиолефинов / Д.Ю. Шитов [и др.] // Пластические массы. – 2015. – № 3-4. – С. 9-12.
9. Полимер-силикатные наноккомпозиты: физико-химические аспекты синтеза полимеризацией in situ / С.Н. Чвалун [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 52-57.

10. Халтуринский, Н.А. Горение полимеров и механизм действия антипиренов / Н.А. Халтуринский, Т.В. Попова, А.А. Берлин // Успехи химии. – 1984. – Т. 53, № 2. – С. 326-346.
11. Antonov, A.V. Combustion of char-forming polymeric systems / A.V. Antonov, I.S. Reshetnikov, N.A. Khalturinskij // Russian Chemical Reviews. – 1999. – Vol. 68, № 7. – P. 605-614.
12. Шуклин, С.Г. Модифицированные полимеры, содержащие углеродные нанотрубки / С.Г. Шуклин, С.В. Бузилов, Д.С. Шуклин // Перспективные материалы. – 2010. – № 4. – С. 61-65.
13. Шайерс, Дж. Рециклинг пластмасс. Наука, технологии, практика: монография / Дж. Шайерс; пер. с англ. – СПб.: Научные основы и технологии, 2012. – 640 с.
14. Шейченко, М.С. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения / М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова, Я.Ю. Вишневская // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – Т. 2, № 5. – С. 15-20.
15. Матюхин, П.В. Термостойкие полимерные композиты для нейтронной и гамма-защиты / П.В. Матюхин // Междунар. научно-исследовательский журнал. – 2014. – № 9 (28). – С. 39-40.
16. Черкашина, Н.И. Нанотрубчатые наполнители с повышенной способностью поглощения гамма-излучения / Н.И. Черкашина, П.В. Матюхин, И.В. Соколенко // Междунар. журн. прикладных и фундам. исслед. – 2015. – № 12-7. – С. 1187-1190.
17. Гульбин, В.Н. Радио- и радиационно-защитные композиционные материалы с наноструктурными наполнителями / В.Н. Гульбин, Н.С. Колпаков, В.В. Поливкин // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 10, № 23 (150). – С. 43-51.
18. Антистатики: химическая энциклопедия: в 5 т. / редкол.: И.Л. Кнунянц (гл. ред.) [и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – С. 339-340.
19. Шеремета, И.А. Анализ влияния параметров наполнителя на электропроводность полимерных материалов / И.А. Шеремета, А.М. Васильев // Достижения науки – агропромышленному производству: материалы LV междунар. науч.-техн. конф., Челябинск, 27-29 янв. 2016 г. / ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ; редкол.: М.Ф. Юдин [и др.]. – Челябинск, 2016. – С. 270-275.
20. Полимерная радиопрозрачная композиция: пат. 2570446C1 RU, МПК C08L63/00 / C09D163/00 / C09D163/02 / C08J5/24 / H01Q17/00 / H01Q1/42 / Е.Н. Каблов, Л.В. Семенова, Т.А. Лебедева, Н.И. Нефедов, М.В. Белова, М.Л. Румянцева, Ф.У. Хусаинова; заявитель ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов». – № 2014137816/05; заявл. 18.09.14; опубл. 10.12.15 // Офиц. Бюл. Федеральной службы по интелект. собственности. – 2015. – № 34. – 8 с.

Информация об авторе

Денис Леонидович Подобед – магистр технических наук, преподаватель, Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси (Речицкий проспект, 35А, 246023, г. Гомель, Беларусь), e-mail: gf@ucp.by. ORCID: 0000-0002-4053-5638.

Information about the author

Denis Leonidovich Podobed – Master of Engineering sciences, Lecturer, Gomel Branch Establishment of the University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus (35A, Rechitsky Ave., 246023, Gomel, Belarus), e-mail: gf@ucp.by. ORCID: 0000-0002-4053-5638.

Поступила в редакцию 05.07.2021 г.

ВОЙТОВ ИГОРЬ ВИТАЛЬЕВИЧ
(к 60-летию со дня рождения)



15 августа 2021 года исполнилось 60 лет ректору Белорусского государственного технологического университета Игорю Витальевичу Войтову.

Игорь Витальевич Войтов – известный государственный деятель, доктор технических наук, профессор, вице-президент Евразийской Академии Горных Наук, крупный ученый в области геоэкологии и геотехнологий, управления и охраны водосборов рек и водоемов, организации мониторинга состояния и изменений окружающей среды, контроля загрязнения природной среды и рационального использования природных ресурсов.

За время своей трудовой деятельности Игорь Витальевич работал в учреждениях науки и образования, являлся первым заместителем министра природных ресурсов и охраны окружающей среды, работал в Государственном комитете по охране природы БССР, возглавлял отдел управления экономики и организации природопользования Государственного комитета по экологии Республики Беларусь, Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь, а с 2016 года возглавляет Белорусский государственный технологический университет.

И.В. Войтов является автором многочисленных научных работ, в том числе монографий, учебников и учебно-методических пособий, принимал и продолжает принимать активное участие в разработке многих государственных научно-технических программ в области использования природных ресурсов и охраны окружающей среды.

Игорь Витальевич вносит огромный вклад в формирование Белорусского государственного технологического университета – ведущего учебного и научно-исследовательского центра страны в области лесного хозяйства, деревообработки, производства строительных материалов, химии и химических технологий, экономики, полиграфии. Под его руководством успешно развивается инновационная инфраструктура университета, созданы десятки научно-исследовательских и испытательных лабораторий, инжиниринговых и научно-практических центров. Ежегодно выполняются сотни научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ. Учеными университета ежегодно публикуются тысячи научных статей в ведущих научных изданиях Республики Беларусь и зарубежных стран, патентуются десятки изобретений и полезных моделей. Университет стал одним из ведущих центров страны по подготовке научных кадров высшей квалификации. Ежегодно сотрудники университета защищают до двух десятков диссертационных работ на соискание ученых степеней, а большинство сотрудников университета имеют ученые степени и звания.

Редколлегия и редакция журнала «Горная механика и машиностроение» поздравляют Игоря Витальевича Войтова с юбилеем и желают крепкого здоровья, творческого долголетия, неиссякаемой энергии и оптимизма.

МАРУКОВИЧ ЕВГЕНИЙ ИГНАТЬЕВИЧ
(к 75-летию со дня рождения)



22 августа 2021 года исполнилось 75 лет Евгению Игнатьевичу Маруковичу – выдающемуся ученому и организатору науки в области технологии металлов, академику Национальной академии наук Беларуси, доктору технических наук, профессору, Заслуженному изобретателю Республики Беларусь, заместителю председателя Ассоциации литейщиков и металлургов Республики Беларусь, главному редактору журнала «Литье и металлургия» и члену редколлегий ряда других научных журналов.

Е.И. Марукович автор более 900 фундаментальных и прикладных научных работ в области материаловедения, машиностроения, металлургии, процессов литья. Им разработана теория кристаллизации и затвердевания отливок при непрерывном литье и получении износостойких отливок, установлены закономерности комплексного влияния тепловых, кинетических, гидродинамических и металлургических параметров на формирование отливки, разработаны методы интенсификации металлургических процессов, выявлены особенности механизма формирования структуры и свойств литых изделий в условиях направленного затвердевания и регулируемого теплоотвода в графитовых, металлических и комбинированных охлаждаемых формах. Е.И. Маруковичем разработаны и внедрены новые материалы и технологические процессы получения заготовок из черных и цветных сплавов для различных отраслей промышленности, что позволило осуществить, в том числе, экспортные поставки высококачественной продукции, а также технологий и оборудования непрерывного литья в десятки стран мира.

Е.И. Марукович пользуется известностью и заслуженным авторитетом в отечественных и зарубежных научных кругах. За выдающиеся достижения в области развития отечественной науки Е.И. Марукович награжден в 1999 году медалью Франциска Скорины, а в 2008 году – Орденом Почета. Е.И. Марукович лауреат Государственной премии БССР 1990 года за исследование, разработку и внедрение эффективных ресурсо- и материалосберегающих экологически безвредных технологических процессов получения высококачественных отливок в условиях централизованного производства, лауреат Премии НАН Беларуси 1999 года за цикл работ по теоретическим основам формирования отливок, лауреат Государственной премии Республики Беларусь 2010 года за работу «Создание и промышленная реализация принципиально нового метода непрерывно-циклического литья намораживанием высокоизносостойких деталей техники».

Е.И. Марукович пользуется известностью и заслуженным авторитетом в отечественных и зарубежных научных кругах. За выдающиеся достижения в области развития отечественной науки Е.И. Марукович награжден в 1999 году медалью Франциска Скорины, а в 2008 году – Орденом Почета. Е.И. Марукович лауреат Государственной премии БССР 1990 года за исследование, разработку и внедрение эффективных ресурсо- и материалосберегающих экологически безвредных технологических процессов получения высококачественных отливок в условиях централизованного производства, лауреат Премии НАН Беларуси 1999 года за цикл работ по теоретическим основам формирования отливок, лауреат Государственной премии Республики Беларусь 2010 года за работу «Создание и промышленная реализация принципиально нового метода непрерывно-циклического литья намораживанием высокоизносостойких деталей техники».

Редколлегия и редакция журнала «Горная механика и машиностроение» поздравляют Евгения Игнатьевича Маруковича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, благополучия и новых творческих успехов.

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 (не менее 5-6 страниц), включая пробелы.
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 индексы:

печатной	74933
версии журнала	749332
электронной	30006
версии журнала	300062

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.

Адрес редакции:

ул. Козлова, 69
223710, г. Солигорск,
Республика Беларусь

ISSN 1728-3841



Контактные данные:

главный редактор (+375 174) 26 28 37
редакция (+375 174) 33 01 07
e-mail: onti@sipr.by
<http://www.sipr.by>