

ISSN 1728-3841

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2021 № 2



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2021 №2

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 2 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](mailto: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**

- Лысенко М.В., Аушев Е.В., Дорохин Н.С.** Поддержание широких горных выработок и сопряжений двухуровневой анкерной крепью ..... 5
- Джураев Р.У., Кахаров С.К., Кологривко А.А., Мустафаев О.Б.** О возможности предупреждения и ликвидации поглощений бурового раствора при бурении скважин в осложненных геологических условиях ..... 13
- Березовский Н.И., Борисейко В.В., Костюкевич Е.К., Клименок М.В.** Разработка методики по использованию рукавных фильтров в торфобрикетном производстве ..... 19

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Макацария Д.Ю.** Совершенствование механизма передачи движения на выходное звено в эксцентриковых передачах типа К-Н-V ..... 27
- Довгалев А.М.** Определение параметров процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания ..... 34
- Коднянко Е.В., Дворник А.П.** Анализ показателей технического состояния вертикальных стволов шахт и жесткой армировки ..... 40
- Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В.** Методика построения имитационных моделей звеносборочных линий ..... 46
- Кудина Е.Ф., Приходько И.В., Карпенко В.В., Курицын П.А.** Влияние климатических факторов на работоспособность электрооборудования ..... 55
- Цыбуленко П.В., Казаченко Г.В.** Особенности прессования мелкодисперсных материалов в валковых прессах ..... 65
- Довгяло В.А., Девицкий Д.С., Максимчик К.В.** Анализ факторов, влияющих на работоспособность подбивочных блоков путевых машин ..... 71
- Павлечко В.Н.** Параметры среды в каналах радиальной турбины при изменении угла наклона лопастей ..... 78
- Басалай Г.А.** Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3 ..... 84

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Францкевич В.С., Новик Д.М.** Исследование коррозионной стойкости нержавеющей стали 1.4462 в насыщенных солевых растворах ..... 89
- Богданович П.Н., Станкевич В.М., Коднянко М.Ю.** Изнашивание полиуретана незакрепленными абразивными частицами ..... 98

### **ЛЮДИ НАУКИ**

- Рыспанов Нурлан Бектасович** (к 60-летию со дня рождения) ..... 104

На обложке: отвалообразователь стреловой шагающий.

На 1-й и 3-й стр.: монтаж отвалообразователя стрелового шагающего.

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

**Подписные индексы:** 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций).

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

---

---

Ответственный секретарь А.В. Протасеня.

Подписано в печать 20.05.2021 г. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>.

Заказ 1702. Усл. печ. л. 12,24. Тираж 100 экз.

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

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

# MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 2 2021

---

---

**Founder of the Journal:**

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

**Scientific and Technical Journal**

Published since December, 1998  
Issued four times a year

**Edition:**

Editor-in-Chief  
**Prushak Viktor Yakovlevich**

Editor-in-Chief Deputy  
**Dvornik Aliaksandr Petrovich**

**Editorial Board:**

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



**Editorial Address:**

69, Kozlova street, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus  
tel: (+375 174) 33 01 07, Fax: (+375 174) 26 28 37  
e-mail: [onti@sipr.by](mailto: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*

<b>Lysenko M.V., Aushev E.V., Dorohin N.S.</b> Supporting wide mine workings and intersections by two-level roof bolting .....	5
<b>Juraev R.U., Kakharov S.K., Kologrivko A.A., Mustafayev O.B.</b> About the possibility of prevention and elimination of drilling mud absorption when drilling of wells in hard geological conditions .....	13
<b>Berezovsky N.I., Boriseyko V.V., Kostyukevich E.K., Klimenok M.V.</b> Development of a technique for use of bag filters in the peat briquetting production .....	19

### *MACHINE-BUILDING*

<b>Gromyko P.N., Khatetovsky S.N., Makatsaryia D.Yu.</b> Improvement of mechanism of motion transfer to output link in eccentric transmissions of K-H-V type .....	27
<b>Dovgalev A.M.</b> Determination of the parameters of the combined magnetic-dynamic rolling process .....	34
<b>Kadnianka A.V., Dvornik A.P.</b> Analysis of technical condition of indicators of vertical mines and rigid reinforcement .....	40
<b>Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V.</b> Methodology for constructing simulation models of link assembly lines .....	46
<b>Kudina H.F., Prihodzko I.V., Karpenko V.V., Kuritsyn P.A.</b> Influence of climatic factors on performance of electrical equipment .....	55
<b>Tsybulenka P.V., Kazachenko G.V.</b> Features of pressing fine materials in roll presses .....	65
<b>Dovgyalo V.A., Devitsky D.S., Maksimchyk K.V.</b> Analysis of factors that affect the performance of road vehicle padding blocks .....	71
<b>Pavlechko U.N.</b> Parameters of the medium in the channels of a radial turbine when the angle of inclination of the blades changes .....	78
<b>Basalai R.A.</b> Dynamic drive models of coaxial rotors of tunnelling machines of the type PKS-8 and KRP-3 .....	84

### *MATERIALS ENGINEERING*

<b>Frantskevich V.S., Novik D.M.</b> Study of corrosion resistance of stainless steel 1.4462 in saturated salt solutions .....	89
<b>Bogdanovich P.N., Stankevich V.M., Kadnianka M.Yu.</b> Polyurethane wear by unfixed abrasive particles .....	98

### *PEOPLE OF SCIENCE*

<b>Ryspanov Nurlan Bektasovich</b> (for the 60 <sup>th</sup> anniversary) .....	104
---	-----

---

---

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

УДК 622.286:622.28.044.5

**Лысенко М.В., Аушев Е.В., Дорохин Н.С.***ООО Научно-исследовательский центр – Институт проектирования  
горных предприятий «РАНК», г. Кемерово, Россия***ПОДДЕРЖАНИЕ ШИРОКИХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СОПРЯЖЕНИЙ  
ДВУХУРОВНЕВОЙ АНКЕРНОЙ КРЕПЬЮ**

**Аннотация.** Увеличение ширины горных выработок и сопряжений требует особого внимания к выбору технологии их поддержания в работоспособном состоянии в течение всего срока эксплуатации. Статья посвящена опыту поддержания широких горных выработок и сопряжений шириной до 20,5 м в угольных шахтах и рудниках с применением анкерной крепи глубокого заложения (второго уровня). По результатам проведенных работ была подтверждена работоспособность, и гибкость технологии анкерного усиления крепи для широких горных выработок и сопряжений.

**Ключевые слова:** широкие горные выработки, сопряжения горных выработок, анкерная крепь, канатный анкер, монтажная камера.

**Lysenko M.V., Aushev E.V., Dorohin N.S.***Research-and-Development Center – Mining Enterprises  
Design Institute “RANK” LLC, Kemerovo, Russia***SUPPORTING WIDE MINE WORKINGS AND INTERSECTIONS  
BY TWO-LEVEL ROOF BOLTING**

**Abstract.** Increasing the width of mine workings and intersections requires special attention to the choice of technologies to maintain them in working condition during the entire service life. The article is devoted to the experience of supporting wide mines workings and intersections up to 20,5 m in coal mines and in mines with the use of deep bolting (second level). Based on the results of the work carried out, the operability and flexibility of the roof bolting technology for wide mine workings and intersections have been proved.

**Keywords:** wide mine workings, intersection mines, roof bolting, rope bolt, longwall startup room.

**Введение.** Рост производительности и технической оснащенности горных предприятий влечет за собой увеличение размеров горных выработок для обеспечения вентиляции, транспортировки и передвижения крупногабаритного оборудования, в том числе при монтаже очистного оборудования. При этом весьма актуальным становится вопрос поддержания широких горных выработок и сопряжений. К основному негативному фактору, связанному с увеличением ширины горных выработок, можно отнести увеличение свода естественного равновесия, в пределах которого горные породы теряют устойчивость, и их вес может создавать избыточную нагрузку на крепь. Кроме этого, существует ряд техногенных факторов, которые необходимо учитывать при решении задач по подбору и расчету параметров крепи горных выработок (влияние очистных работ, буровзрывные работы и др.).

К современным технологиям проведения и крепления горных выработок предъявляются высокие требования по уровню механизации и производительности, уменьшению доли материальных затрат на возведение крепи при сохранении высоких эксплуатационных качеств, обеспечивающих безремонтное поддержание выработок в течение всего срока их службы в различных условиях.

В настоящее время подавляющая часть горных выработок на угольных шахтах и рудниках проводится с применением анкерной крепи. Наиболее сложным аспектом применения анкерной крепи, требующим специальных компетенций, является определение ее параметров и выбор оптимальных схем заложения анкеров в приконтурном массиве широких горных выработок.

Говоря о ширине горных выработок, необходимо отметить, что в настоящее время нет четкой и общепринятой классификации выработок по данному критерию. Например, согласно Инструкции [1] широкими являются выработки, ширина которых более 6 м. Согласно [2], широкими можно считать выработки шириной более 4-6 м, так как это предельный размер пролета, который можно удержать анкерами распространенной длины, равной 2-3 м. При этом важно понимать, что в определенных горно-геологических условиях выработки могут сохранять устойчивое состояние и без крепи. Таким образом, можно сделать вывод о том, что понятие «широкая выработка» в контексте их крепления является относительным и может применяться к выработкам такой ширины, при которой ее безаварийное поддержание возможно только с использованием крепи усиления.

**Основная часть.** Перераспределение напряжений в массиве горных пород при проведении и поддержании широких выработок и сопряжений сопровождается формированием зон концентрации напряжений и значительными горизонтальными и вертикальными смещениями пород, как по контуру выработки, так и во вмещающем массиве. Большая ширина горной выработки  $B$  в совокупности с горно-геологическими и

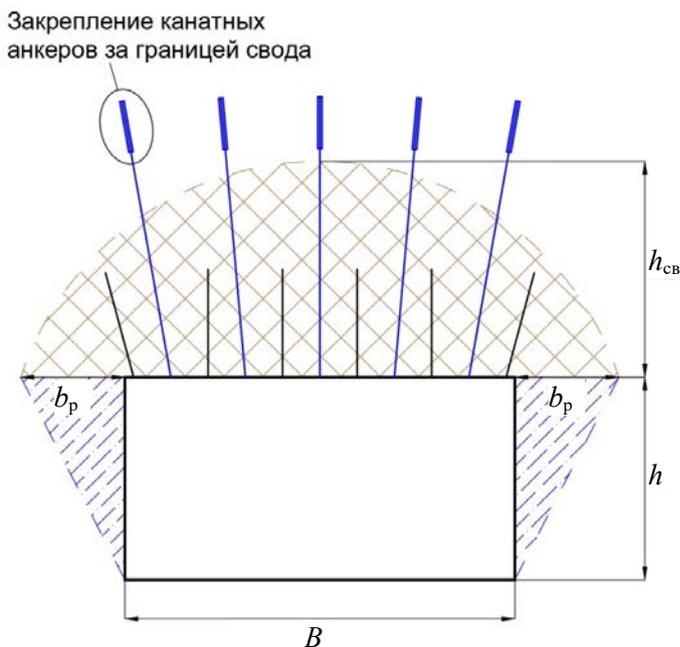
техногенными факторами способствует формированию обширных зон разрушения (отжим) в боках  $b_p$  и, как следствие, увеличению фактического поддерживаемого пролета до  $B_p$  (1):

$$B_p = B + 2b_p, \quad (1)$$

$$b_p = h \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{90^\circ - \varphi}{2}\right), \quad (2)$$

где  $h$  – высота горной выработки, м;  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения угля (породы) в боках горной выработки, град.

Объем неустойчивых горных пород, находящихся в пределах свода естественного равновесия кровли, имеет прямую связь с шириной горной выработки (рисунок 1), и, как следствие, при креплении широких горных выработок значительно возрастают



$h_{св}$  – высота свода естественного равновесия, м

**Рисунок 1. – Формирование областей потери устойчивости приконтурного массива горной выработки**

требования к несущей способности элементов крепи. Для поддержания выработок в безопасном состоянии и предотвращении вывалов горных пород требуется дополнительное усиление основной крепи.

Традиционно для усиления крепи широких горных выработок применяются крепи подпорного типа (стоечная, смешанная, рамная, камерные балки и др. аналогичные крепи), главными недостатками которых являются:

- высокая материалоемкость и стоимость;
- снижение несущей способности при увеличении пролета выработки;
- пассивный режим работы (восприятие нагрузки и предотвращение перемещений уже разрушенной породы);

- трудоемкость транспортировки и монтажа.

В сравнении с подпорной, анкерная крепь обладает следующими преимуществами [3]:

- низкие материальные затраты и металлоемкость;
- низкая трудоемкость при доставке и установке;
- рост стоимости и материальных затрат пропорционален росту несущей способности;

- не препятствует проходу людей и транспортировке оборудования;

- не требует перемонтажа крепи при установке оборудования в выработке;

- активное взаимодействие с массивом с момента монтажа.

Устойчивость кровли горной выработки, закрепленной анкерной крепью, обеспечивается совокупностью работы разных моделей взаимодействия анкера с массивом: сшивки, подвешивания, расклинивания и стабилизации (армирования), за счет чего повышается устойчивый пролет обнажения кровли. Например, Зейнуллин А.А. [4] указывает, что при формировании системы «крепь - массив» с контролируемыми и управляемыми параметрами возможно существенное влияние на развитие геомеханических процессов вблизи выработки, так как анкерная крепь изменяет прочностные характеристики массива и активно участвует при перераспределении напряжений.

Для обеспечения устойчивого состояния широких выработок и сопряжений на весь период эксплуатации наиболее целесообразным является применение двухуровневой схемы анкерного крепления, где кроме анкеров I уровня (длиной до 3 м), используются анкеры II уровня (глубокого заложения). Анкеры глубокого заложения закрепляются в устойчивых породах кровли за пределами свода естественного равновесия, определенного с учетом ослабления и деформации боков выработки (рисунок 1), тем самым выполняя в том числе функцию подвешивания.

Учитывая многолетний опыт нашей компании [3, 5-9] и международную практику применения анкерной крепи [10-12], можно утверждать, что двухуровневая схема анкерного крепления зарекомендовала себя как наиболее эффективный способ поддержания сопряжений выработок, как с точки зрения безопасности горных работ, так и с учетом материальных затрат и удобства эксплуатации.

**Методика расчета.** Параметры канатных анкеров в качестве крепи усиления (анкерной крепи второго уровня) рассчитываются на основе оценки геомеханического состояния приконтурного массива выработок с позиций теории свода.

Нагрузка на крепь усиления  $P$  рассчитывается в зависимости от высоты свода естественного равновесия пород кровли [13]:

$$P = \frac{2}{3} B_p h_{св} \gamma, \quad (3)$$

где  $h_{св}$  – высота свода естественного равновесия горных пород над горной выработкой, м;  
 $\gamma$  – объемный вес пород кровли, т/м<sup>3</sup>.

$$h_{\text{св}} = k_{\text{св}} B_p, \quad (4)$$

где  $k_{\text{св}}$  – коэффициент свода естественного равновесия.

Для угольных шахт Кузбасса значение коэффициента свода естественного равновесия  $k_{\text{св}}$  определяется согласно Инструкции [1] и зависит от прочности пород кровли и воздействия техногенных факторов на выработку (в зоне действия опорного давления или вне зоны). Следует отметить, что величины коэффициента свода естественного равновесия были определены эмпирически, по результатам многолетних исследований и наблюдений на шахтах Кузнецкого угольного бассейна. Для других месторождений, в том числе рудных, значения коэффициентов могут значительно отличаться и требуют уточнения как на основании натуральных исследований, так и с применением методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива.

Таким образом, методика расчета параметров двухуровневой анкерной крепи или крепи усиления для рудников индивидуальна и разрабатывается, исходя из уникальных горно-геологических условий, физико-механических свойств горных пород и трещиноватости массива. Так, например, для рудника «Айхал» дополнительно учитывался фактор растепления горных пород в связи с ведением горных работ в условиях вечной мерзлоты [9].

**Примеры.** На сегодняшний день специалистами НИЦ-ИППП «РАНК» накоплен богатый опыт применения канатных анкеров для усиления крепи широких выработок на шахтах и рудниках России, а также ближнего зарубежья: шахты «Комсомолец», «Костромовская», «им. 7 Ноября», «Красноярская», «Романовская», «Чертинская-Коксовая», «Байкаимская», «Владимирская», МУК-96, «им. В.Д. Ялевского» и рудники «Айхал», «Интернациональный», «им. 10-летия независимости Казахстана» (Донской ГОК). Практика показывает, что канатные анкера могут быть успешно использованы в качестве крепи усиления в выработках с анкерной крепью, а также с рамно-анкерной и рамной крепью [3].

На руднике «Айхал» Айхальского ГОКа АК «АЛРОСА» (ПАО) реализован проект решения проблемы поддержания широкопролетных сопряжений (ширина более 12 м) в сложных горно-геологических условиях при помощи многофункциональных анкеров глубокого заложения с целью исключения вывалообразований, а также снижения финансовых и трудовых затрат на возведение крепи.

Крепление кровли сопряжения осуществлялось по двухуровневой схеме:

- крепление кровли при проведении горных выработок осуществляется анкерами первого уровня (типа СЗА или АКМ20.01);
- усиление крепи кровли осуществляется анкерами глубокого заложения (типа АК01-25 с несущей способностью 250 кН), с глубиной закрепления за сводом естественного равновесия пород не менее 1,1 м (рисунок 2).

Применение технологии крепления данного широкопролетного сопряжения при помощи многофункциональных канатных анкеров позволило полностью отказаться от возведения рамной крепи сопряжения (камерной рамы) [7].

Положительные результаты также были достигнуты в условиях шахты «Байкаимская», где по схеме, показанной на рисунке 3, была закреплена монтажная камера 2бис и ее сопряжение. Ширина монтажной камеры 2бис составила 9,0 м, высота – 3,7 м, ширина и высота штреков – 4,5 м и 3,7 м, соответственно. Проведение монтажной камеры осуществлялось в два этапа (разрезная печь и расширение печи до полного сечения монтажной камеры). Крепление производилось анкерной крепью по двухуровневой схеме: комбинированные анкера первого уровня и канатные анкера второго уровня. Состояние приконтурного массива горных пород монтажной камеры на период ее экс-

плуатации было устойчивым, подхваты и решетчатая затяжка поджаты к кровле, гайки на анкерах затянуты, провисания решетчатой затяжки и отслоения породы не наблюдались, порывы опорных элементов отсутствовали.

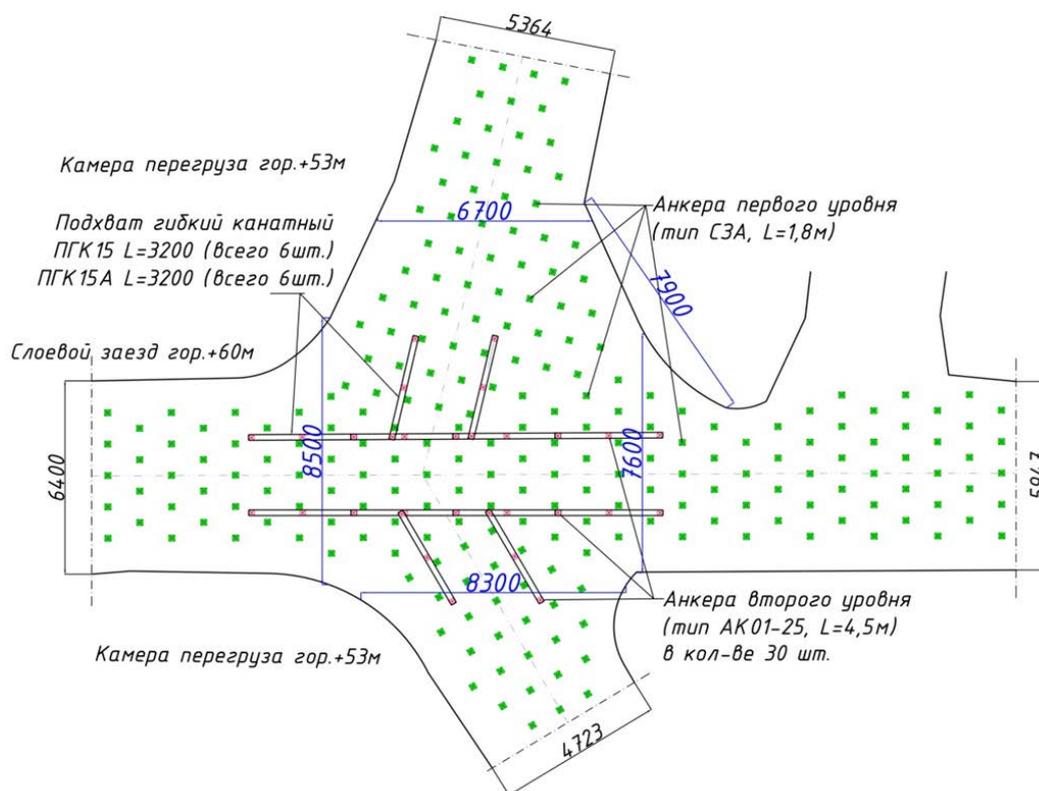


Рисунок 2. – Схема усиления крепи сопряжения многофункциональными канатными анкерами на руднике «Айхал»

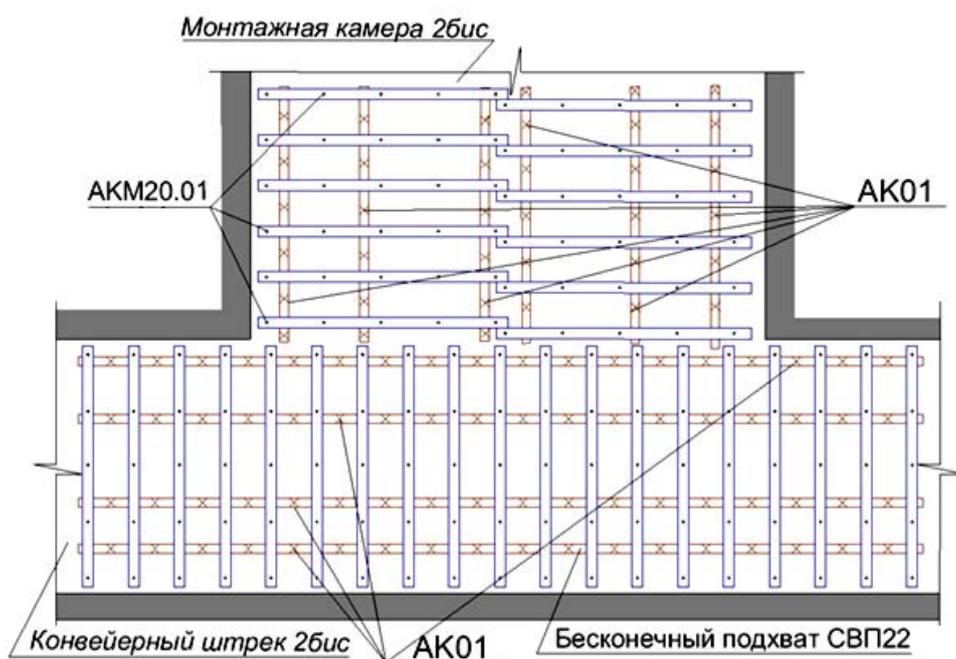


Рисунок 3. – Схема крепи сопряжения монтажной камеры с конвейерным штреком шахты «Байкаимская»

В условиях шахты МУК-96 первоначально для крепления сопряжений (рисунок 4) рассматривалось два варианта: рамное и анкерное крепление. Из-за значительной трудоемкости возведения временной и основной крепи для обеспечения безопасности работ при рамном креплении был выбран второй вариант. В таблице представлено сравнение экономических показателей крепления по аналогичным технологиям на примере сопряжения.

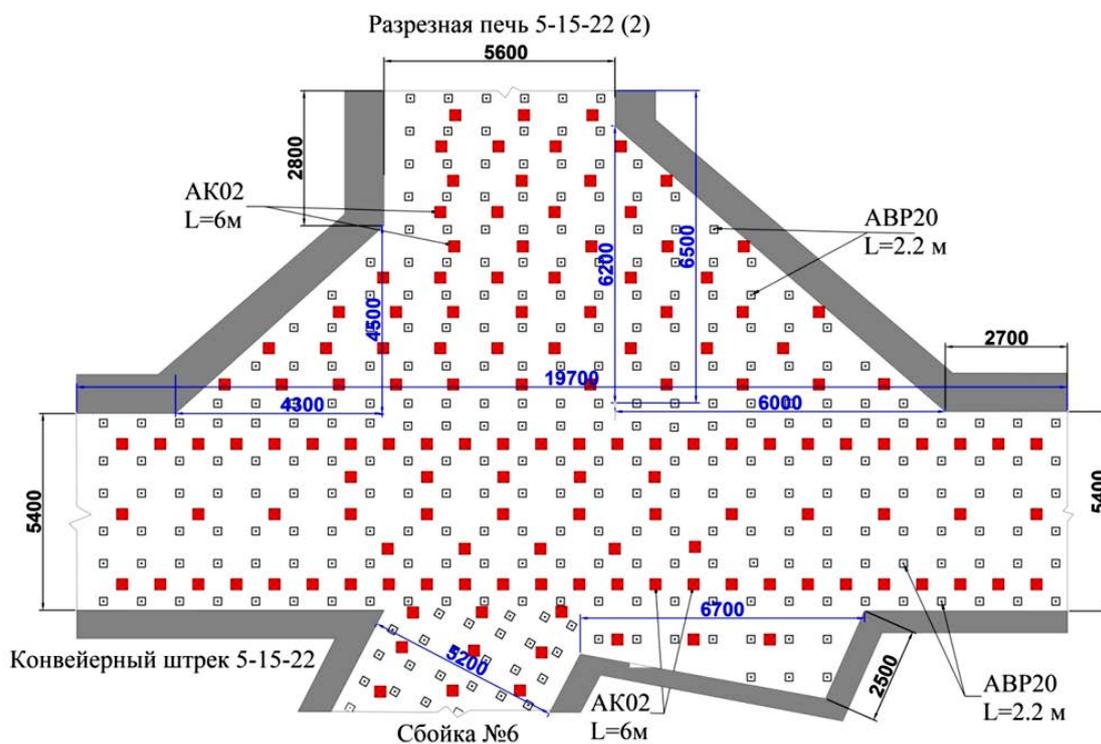


Рисунок 4. – Схема крепи сопряжения шахты МУК-96

Таблица. – Сравнение затрат на крепления сопряжения (в российских рублях) главного конвейерного штрека 5-15 со сбойкой № 6

Наименование статей затрат	Рамное крепление	Анкерное крепление	Снижение затрат при анкерном креплении
материалы, тыс. руб.	1884,6	374,4	1510,2
заработная плата, тыс. руб.	304,9	192,3	112,6
начисления, тыс. руб.	868,4	401	467,4
в т.ч. накладные расходы 91,8 %, тыс. руб.	279,9	176,5	103,4
сметная прибыль 40 %, тыс. руб.	122	76,9	45,1
НДС, тыс. руб.	466,5	147,6	318,9
ВСЕГО, тыс. руб.	3926,3	1368,7	2557,6
трудоемкость, чел. смен	159	106	53

Как видно из таблицы в данных горнотехнических условиях применение двухуровневой анкерной крепи позволяет примерно в 1,5 раза снизить трудоемкость и в три раза – затраты на крепление сопряжений [14].

**Выводы.** Канатные анкеры обладают многофункциональностью, имеют высокую несущую способность и могут устанавливаться в выработках небольшой высоты. Применение канатных анкеров на угольных шахтах и рудниках в качестве крепи усиления способствует повышению надежности работы основной крепи и безопасности условий поддержания широких выработок и сопряжений.

По результатам проведенных работ были сделаны следующие выводы о преимуществах анкерного крепления широких горных выработок и сопряжений по двухуровневой схеме в сравнении с рамной крепью:

- уменьшение металлоемкости более чем в 5 раз и снижение общих затрат на крепление и усиление крепи более чем в 3 раза;
- снижение трудоемкость выполнения работ по усилению крепи канатными анкерами на 33 % по сравнению с возведением рамной крепи;
- обеспечивается связывание и упрочнение пород сразу после монтажа анкерной крепи, образуется система «крепь - массив», в результате чего уменьшаются расслоения вмещающих пород;
- анкерная крепь не препятствует проходу людей и транспортировке оборудования и снижает аэродинамическое сопротивление горных выработок;
- технология крепления сопряжений горных выработок при помощи многофункциональных канатных анкеров позволяет полностью отказаться от возведения рамной крепи сопряжения (камерной рамы);
- обеспечивается повышение безопасности труда, за счет более качественного крепления сопряжений и исключения возможных обрушений кровли горных выработок.

#### Список использованных источников

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по расчету и применению анкерной крепи на угольных шахтах»: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.11.2020 г. № 448 [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573264130>. – Дата доступа: 22.03.2021.
2. Ran, J.J. Safe mining practices under wide spans in underground non-caving mines – Case studies / J.J. Ran // International Journal of Mining Science and Technology: [Электронный ресурс]. – 2019. – № 20. – P. 535-540. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/334004120\\_Safe\\_mining\\_practices\\_under\\_wide\\_spans\\_in\\_underground\\_non-caving\\_mines\\_-\\_Case\\_studies](https://www.researchgate.net/publication/334004120_Safe_mining_practices_under_wide_spans_in_underground_non-caving_mines_-_Case_studies). – Дата доступа: 22.03.2021.
3. Самок, А.В. Канатный анкер АК 01: широкие выработки и их сопряжения / А.В. Самок, Г.В. Райко, П.В. Гречишкин // Уголь. – 2011. – № 5. – С. 80-81.
4. Зейнуллин, А.А. Оценка способов поддержания горных выработок на основе применения анкерной крепи на шахтах Карагандинского угольного бассейна / А.А. Зейнуллин, Е.А. Абеуов, В.Ф. Демин // Уголь. – 2021. – № 2. – С. 4-9.
5. Совершенствование двухуровневой технологии анкерного крепления широких сопряжений горных выработок / В.А. Еременко [и др.] // ГИАБ. – 2013. – № 5. – С. 20-30.
6. Аушев, Е.В. Геомеханическое обоснование поддержания широкопролетного сопряжения горных выработок в зоне влияния очистного забоя // ГИАБ. – 2018. – С. 95-102.
7. Поддержание широкопролетных сопряжений горных выработок при помощи анкеров глубокого заложения / М.В. Лысенко [и др.] // Горный журнал Казахстана. – 2018. – № 9. – С. 30-33.

8. Современные технологии анкерного крепления: опыт применения и перспективы / В.И. Клишин [и др.] // Рудник будущего. – 2012. – Вып. № 3 (11). – С. 89-96.
9. Применение анкеров глубокого заложения при поддержании широкопролетных сопряжений горных выработок в условиях рудника «Айхал» / Лысенко, М.В. [и др.] // Горный журнал. – 2020. – № 2. – С. 71-74.
10. Hutchinson, D. Jean. Cablebolting in underground mines / D. Jean Hutchinson, Mark S. Diederichs. – BiTech Publishers Ltd., British Columbia, 1996. – 406 p.
11. Kang, H. Support technologies for deep and complex roadways in underground coal mines: a review / H. Kang // International Journal of Coal Science & Technology: [Электронный ресурс]. – 2014. – № 1 (3). – P. 261-277. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0043-0>. – Дата доступа: 22.03.2021.
12. Comprehensive Investigation On Roadway Intersection Stability of Coal Mines In China / T.K. Lu [and oth.] // International Symposium on Rock Mechanics – SINOROCK 2009, Hongkong, 19-25 May, 2009; The University of Hong Kong. – China, 2009. – P. 199-204.
13. Механика горных пород и устойчивость выработок шахт Кузбасса / В.М. Станкус [и др.]; под ред. В.Г. Кожевина. – Кемерово: Кемеровское книжное издательство, 1973. – 345 с.
14. Опыт поддержания широких сопряжений горных выработок с применением двухуровневой анкерной крепи в условиях шахты МУК-96 / Е.А. Разумов [и др.] // Уголь. – 2013. – № 7. – С. 31-34.

---

#### Информация об авторах

*Лысенко Максим Владимирович* – заместитель директора по научной работе и инновациям, ООО НИЦ-ИПГП «РАНК» (Советский пр., 7, 650000, г. Кемерово, Россия), e-mail: [limak2@yandex.ru](mailto:limak2@yandex.ru).

*Аушев Евгений Викторович* – начальник отдела по инновационному развитию, ООО НИЦ-ИПГП «РАНК» (Советский пр., 7, 650000, г. Кемерово, Россия), e-mail: [aushevev@rank42.ru](mailto:aushevev@rank42.ru).

*Дорохин Никита Сергеевич* – специалист по инновационному развитию, ООО НИЦ-ИПГП «РАНК» (Советский пр., 7, 650000, г. Кемерово, Россия), e-mail: [dorohinns@rank42.ru](mailto:dorohinns@rank42.ru).

#### Information about the authors

*Lysenko Maxim Vladimirovich* – Deputy Director for Research and Innovation, LLC RDC-MEDI “RANK” (7, Sovetskiy Ave, 650000, Kemerovo, Russia), e-mail: [limak2@yandex.ru](mailto:limak2@yandex.ru).

*Aushev Evgeniy Victorovich* – Head of Innovation Development, LLC RDC-MEDI “RANK” (7, Sovetskiy Ave, 650000, Kemerovo, Russia), e-mail: [aushevev@rank42.ru](mailto:aushevev@rank42.ru).

*Dorohin Nikita Sergeevich* – Innovation Specialist, LLC RDC-MEDI “RANK” (7, Sovetskiy Ave, 650000, Kemerovo, Russia), e-mail: [dorohinns@rank42.ru](mailto:dorohinns@rank42.ru).

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

УДК 622.248.33(045)

**Джураев Р.У.<sup>1</sup>, Кахаров С.К.<sup>2</sup>, Кологривко А.А.<sup>3</sup>, Мустафаев О.Б.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Узбекистан<sup>2</sup>Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Алмалык, Узбекистан<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ПОГЛОЩЕНИЙ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН В ОСЛОЖНЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

**Аннотация.** Избыточное поглощение промывочной жидкости при бурении скважин является одной из самых затратных и труднорешаемых проблем в горно-геологической отрасли. Наиболее распространенные способы предупреждения и ликвидации высокоинтенсивных поглощений являются, как правило, весьма трудоемкими и не всегда эффективными.

В данной статье приведены теоретические и аналитические исследования методов предупреждения и ликвидации избыточного поглощения буровых растворов при бурении скважин в осложненных горно-геологических условиях и обоснование наиболее эффективных методов предупреждения и ликвидации избыточного поглощения бурового раствора.

**Ключевые слова:** поглощение, скважина, буровой раствор, очистка забоя, наполнители, гибкий контейнер, обсадка, газожидкостные смеси, ликвидация, предупреждения, каверны, трещина.

**Juraev R.U.<sup>1</sup>, Kakharov S.K.<sup>2</sup>, Kologrivko A.A.<sup>3</sup>, Mustafayev O.B.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan<sup>2</sup>Almalyk branch of the National Research Technological University "MISIS", Almalyk, Uzbekistan<sup>3</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## ABOUT THE POSSIBILITY OF PREVENTION AND ELIMINATION OF DRILLING MUD ABSORPTION WHEN DRILLING OF WELLS IN HARD GEOLOGICAL CONDITIONS

**Abstract.** Excessive absorption of drilling fluid during well drilling is one of the most costly and difficult to solve problems in the mining and geological industry. The most common methods of preventing and eliminating high-intensity takeovers are, as a rule, very laborious and not always effective.

This article presents theoretical and analytical studies of methods for preventing and eliminating excessive loss of drilling fluids when drilling wells in complicated geological conditions and substantiation of the most effective methods for preventing and eliminating excessive loss of drilling fluid.

**Keywords:** absorption, well, drilling mud, bottomhole cleaning, fillers, flexible container, casing, gas-liquid mixtures, elimination, prevention, caverns, fracture.

**Введение.** В мировой практике добычи полезных ископаемых наблюдается тенденция интенсификации использования технологий глубокого и сверхглубокого бурения, вызванная необходимостью поддержания существующего уровня их потребления, что вызывает повышение материальных и временных затрат, связанных с увеличением объемов буровых работ в осложненных условиях.

Таким образом, актуальной задачей первостепенной практической важности является повышение эффективности бурения скважин в сложных горно-геологических и технологических условиях.

**Основная часть.** Одним из наиболее распространенных осложнений, возникающих в процессе бурения глубоких и сверхглубоких скважин, является избыточное поглощение промывочной жидкости. Затраты на ликвидацию такого рода осложнений достаточно высоки, а на особо проблемных участках превышают 33 % материальных и 25 % временных затрат [1].

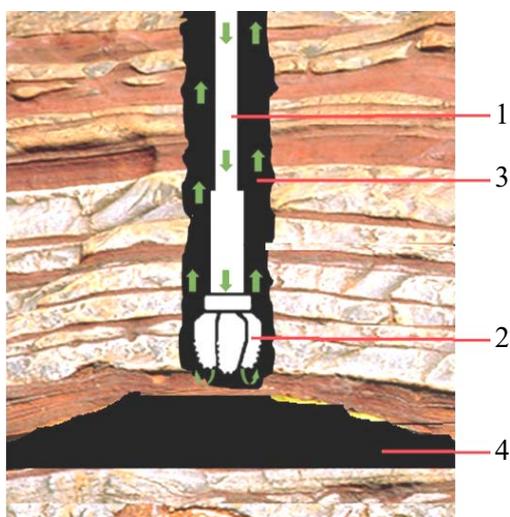
В процессе бурения по пластам карбонатных пород, которые обладают естественной трещиноватостью, образующей разветвленную сеть вертикальных и наклонных трещин значительного объема, происходит полное (катастрофическое) поглощение промывочной жидкости [2].

На рисунке 1 показано проявление катастрофического поглощения бурового раствора за счет присутствия естественной каверны.

Буровой шлам из забоя, образованный в результате бурения без выхода промывочной жидкости, вместе с буровым раствором уходит в трещины или в каналы поглощения. Интенсивность потери жидкости обусловлена снижением гидростатического и гидродинамического давления, вызванным уменьшением плотности бурового и тампонажного раствора.

К снижению плотности промывочной жидкости следует относиться с особой осторожностью, особенно при наличии в необсаженном стволе напорных пластов и неустойчивых пород.

В целях снижения интенсивности зон полного поглощения при их ликвидации применяется метод намыва наполнителей, заключающийся в следующем: поровые каналы и трещины закупориваются с помощью различных по виду и фракционному составу материалов, доставляемых в зону поглощения буровыми растворами, инверсными эмульсиями и проч. По размеру трещин и каверн подбираются пропорциональные размеры наполнителей, в качестве которых могут быть использованы опилки гранулированные



1 – бурильная труба; 2 – породоразрушающий инструмент; 3 – циркуляция буровой жидкости; 4 – каверна  
Рисунок 1. – Проявление катастрофического поглощения промывочной жидкости

пластмассы, целлофановая либо древесная стружка, ореховая скорлупа, резиновая крошка, кордное волокно, опилки, песок, щебень, измельченная солома, комки глины, слюда, подсолнечная лузга «кожа-горох», отходы реактопласта и прочие материалы [3].

Закупоривающие материалы характеризуются формой, жесткостью и плотностью частиц, а также оптимальным распределением их размеров [4].

Повышение закупоривающей способности буровых и тампонажных растворов обеспечивается добавлением в них наполнителей, что ведет к снижению расхода базовых материалов для их приготовления и экономии времени на изоляционные работы.

Длительность процесса намыва может варьироваться по времени от нескольких часов при закачивании отдельных тампонов и до нескольких суток при непрерывном закачивании раствора и постоянном вводе наполнителя.

Тампоны типа «мягких» пробок широко применяются при полном (катастрофическом) поглощении промывочной жидкости. Тампоны такого типа представляют со-

бой тестообразную массу из смешанных с глинистым или цементным раствором различных наполнителей. Концентрированная масса под давлением вводится в зону поглощения в составе бурового раствора. Масса наполнителя в тампоне составляет 150 кг на 1 м<sup>3</sup> бурового раствора. Объем тампона зависит от мощности поглощающего пласта и варьируется в пределах от 5 до 50 м<sup>3</sup>. Поглощающие каналы изолируются с помощью загустевающих или твердеющих тампонажных смесей, приготовленных на поверхности и закачиваемых по стволу скважины или по бурильным трубам.

Смесь закачивается в поглощающий пласт при наличии превентора в устье скважины или пакера на концах бурильных труб.

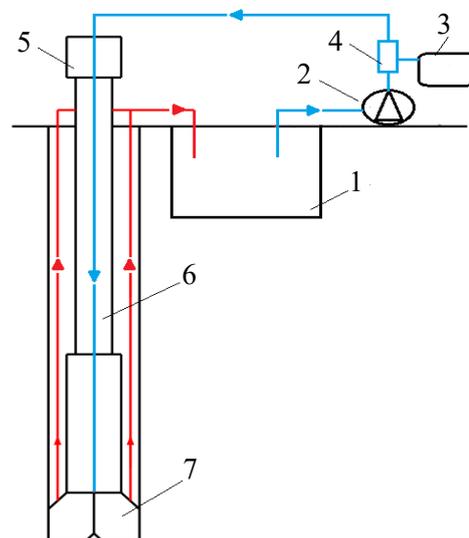
Снижение плотности буровой жидкости также возможно методом аэрации – насыщением раствора воздухом. Сущность метода заключается в очистке забоя аэрированной жидкостью или водным раствором поверхностно-активных веществ (ПАВ) в индивидуальных пропорциях для различных горно-геологических участков. При этом аэрированная смесь выполняет все функции очистного агента. Положительная особенность аэрированных жидкостей – большая вязкость, причем повышение вязкости растворов происходит с уменьшением их плотности.

Аэрация раствора может производиться компрессорным либо бескомпрессорным способом. Компрессорный способ заключается в закачке через специальные устройства сжатого воздуха в нагнетательную линию насоса. Бескомпрессорный – в обработке промывочной жидкости ПАВ (сульфонол, диталан), лигносульфонатами (ФХЛС, КССБ) и другими вспенивающими реагентами [5]. На рисунке 2 представлена схема процесса аэрации промывочной жидкости с применением компрессора [6-8].

Для аэрированных растворов характерны свойства, аналогичные свойствам жидкости, на основе которой они приготовлены (способность образовывать глинистую корку, наличие вязкости и напряжения сдвига, сохранение естественной проницаемости призабойной зоны пласта при его вскрытии). Основное назначение аэрированных жидкостей – использование их в сложных горно-геологических условиях бурения, в том числе при полном поглощении и при разработке пластов с низким давлением. Недостатком данного метода является высокая стоимость сырья, а также использование передвижной компрессорной установки.

Ликвидация полного поглощения возможна также методом использования перекрывающих устройств с тампонирующей смесью, опускаемых в зону перекрытия поглощающих каналов. С помощью гибкого контейнера, изображенного на рисунке 3, зона полного поглощения с большими кавернами и трещинами перекрывается достаточно эффективно и быстро.

При ликвидации полного поглощения буровой жидкости контейнер, изготовленный из сетчатого материала, пропускающий тампонирующие растворы, опускается в скважи-



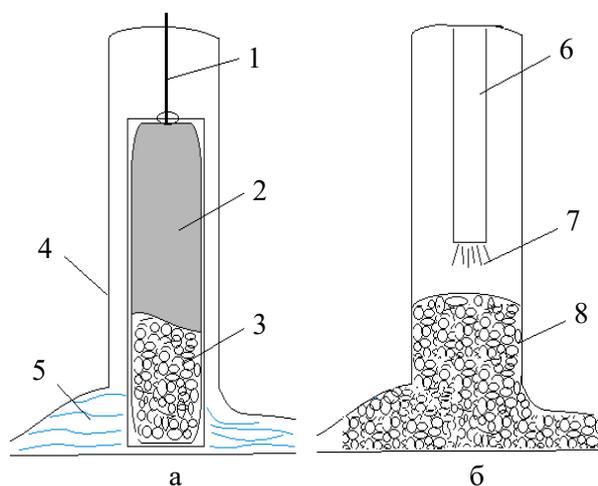
1 – емкость с промывочной жидкостью;  
2 – буровой насос; 3 – компрессор;  
4 – смеситель; 5 – вертлюг-сальник;  
6 – бурильная колонна; 7 – долото  
Рисунок 2. – Схематический вид аэрации буровой жидкости с применением компрессора

ну. Контейнер свободно ложится в забой скважины после достижения поглощающего интервала. После частичного перекрытия каналов ухода промывочной жидкости в результате заполнения неровностей и трещин ствола скважины твердыми частицами под их собственным весом, в скважину вводят бурильные трубы с наконечниками. По наконечникам закачивается проникающий через контейнер раствор, заполняющий пространство между твердыми частицами и образующий после затвердевания монолитный барьер, препятствующий поглощению промывочной жидкости в скважине. В процессе разбуривания центральной части пробки, трещины остаются наполненными цементным камнем, тем самым позволяя бурить скважину в дальнейшем без поглощений.

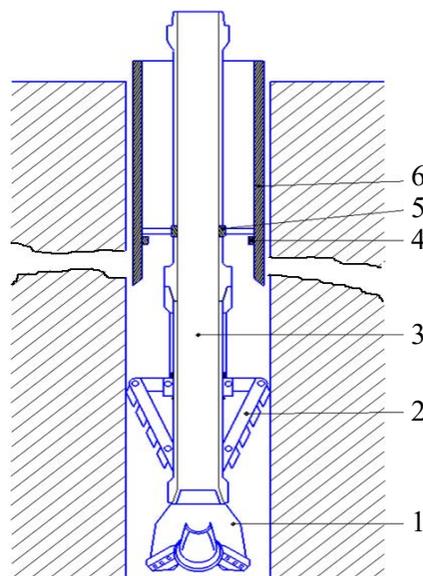
Данный способ является достаточно эффективным при бурении скважин в устойчивых породах. При бурении в слабосвязанных и неустойчивых породах падение уровня промывочной жидкости в стволе может стать индикатором высокой вероятности обрушения стенок скважины, что исключает возможность проведения работ по ликвидации поглощения бурового раствора.

В случае катастрофического поглощения промывочной жидкости, когда описанные выше способы являются малоэффективными или неэффективными вообще, «проблемную зону» скважины изолируют обсадной трубой, однако на месте работ с преобладанием горизонтов неустойчивых пород, где высока вероятность аварийных ситуаций в виде прихвата внутрискважинного инструмента, буровики вынуждены «обшивать» обсадной колонной всю протяженность скважины. Данное мероприятие требует дополнительных затрат времени и материальных средств.

В целях снижения материальных и временных затрат авторами предлагается устройство бурового снаряда для бурения с одновременной обсадкой стенок скважин, приведенное на рисунке 4.



**а** – исходное положение; **б** – контейнер на забое скважины; **1** – канат; **2** – гибкий пористый контейнер; **3** – твердые тела; **4** – стенка скважины; **5** – трещины; **6** – наконечник бурильной колонны; **7** – струя буровой жидкости; **8** – тампонирующая смесь  
Рисунок 3. – Гибкий контейнер для перекрытия больших трещин



**1** – долото; **2** – расширитель; **3** – переходник; **4** – ограничительное кольцо; **5** – подшипник; **6** – обсадная труба  
Рисунок 4. – Устройство бурового снаряда для бурения с одновременной обсадкой стенок скважин

Устройство бурового снаряда для бурения с одновременной обсадкой стенок скважины работает следующим образом. При возникновении поглощения промывочной жидкости в процессе бурения бурильная колонна полностью поднимается на поверхность, и в скважину спускается предлагаемое устройство. При этом долото имеет меньший диаметр, чем обсадная труба. Над долотом установлен расширитель, за счет осевой нагрузки на него расширяется на 4-5 мм больше наружного диаметра обсадной трубы, обсадная труба постепенно наращивается.

По завершении процесса бурения бурильная колонна поднимается вверх, при этом расширитель складывается и вместе с долотом поднимается, оставляя обсадную колонну в скважине.

В таблице приведен сравнительный анализ затрат на бурение геотехнологической скважины традиционным методом (полной обсадкой скважины) и предлагаемым методом.

Таблица. – Затраты на бурение эксплуатационной скважины (глубина 350 м, диаметр 215 мм)

Статья расходов	Затраты на бурение традиционным методом, доллар США	Затраты на бурение предлагаемым методом, доллар США
буровой раствор (глина, жидкое стекло, техническая вода)	354,6	182,16
буровое долото	5714	5714
расширитель	142,8	171,4
обсадная труба	6742,8	154,2
энергетические затраты	153,8	153,8
буровая штанга	18942,8	18942,8
Итого	32050,8	25318,36

**Заключение.** Анализ способов предупреждения и ликвидации поглощения бурового раствора показывает, что бурение с одновременной обсадкой скважин представляет собой наиболее эффективную альтернативу другим методам. Предлагаемый метод позволит решить проблему поглощения с минимальными затратами материальных ресурсов и времени, обеспечивая высокий уровень прямолинейности скважины и способствуя достижению необходимой глубины скважины, без прерывания технологического процесса бурения.

Экономический эффект предлагаемого метода бурения одной эксплуатационной скважины достигает 6732,4 долларов США за счет снижения затрат на обсадные трубы и промывочную жидкость. Помимо прочего предлагаемый метод позволит значительно снизить количество аварийных ситуаций в осложненных геологических условиях, что несомненно повлияет на производительность и ресурсосбережение предприятия.

#### Список использованных источников

1. Managed pressure drilling / B. Rehm [at al.] // Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2008. – 369 p.
2. Sanders, M.W. High-fluid-loss, high-strength Lost circulation treatments / M.W. Sanders, J.T. Scorsone, J.E. Friedheim // SPE paper 135472 presented at the SPE deepwater drilling and completions conference held in Galveston, 5-6 October, 2010. – Galveston, Texas, USA. – 2010.

3. A.L. Maskary S. Curing losses while drilling & cementing / A.L. Maskary S., Abdul Halim A., A.I. Menhali S. // SP paper 171910 presented at the Abu Dhabi international petroleum exhibition and conference held in Abu Dhabi, 10-13 November, 2014. – Dhabi, UAE. – 2014.
4. Simulation of thermal power on bottomhole on the bases of experimental studies of drilling tool operation / M.V. Merkulov [at al.] // International Journal of Emerging Trends in Engineering Researс. – 2020. – № 8. – P. 4383-4389.
5. Михеев, В.Л. Технологические свойства буровых растворов / В.Л. Михеев. – М.: Недра, 1979. – 214 с.
6. Djuraev, R.U. The possibility of increasing efficiency of drilling assembly on the basis of using a vortex tube / R.U. Djuraev, G.E. Raikhanova // Solid State Technology. – 2020. – V. 63. – P. 9728-9734.
7. Djuraev, R.U. Normalization of the temperature conditions of wells when drilling with air blowing / R.U. Djuraev, M.V. Merkulov. – Navoiy: “A. Navoiy”, 2016. – 128 p.
8. Крылов, В.И. Изоляция поглощающих пластов в глубоких скважинах / В.И. Крылов. – М.: Недра, 1980. – 304 с.

#### Информация об авторах

*Джуроев Рустам Умарханович* – доктор технических наук, доцент, исполняющий обязанности профессора кафедры «Горная электромеханика», Навоийский государственный горный институт (ул. Южная 27а, 210100, г. Навои, Узбекистан), e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru.

*Кахаров Сергей Каримович* – кандидат технических наук, доцент, заместитель декана Горно-металлургического факультета, Алмалыкский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (ул. Амира Темура, 56, 110100, г. Алмалык, Узбекистан), e-mail: misterksk79@mail.ru.

*Кологривко Андрей Андреевич* – кандидат технических наук, доцент, декан факультета горного дела и инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kologrivko@tut.by.

*Мустафаев Ойбек Бобомуратович* – старший преподаватель кафедры «Горная электромеханика», Навоийский государственный горный институт (ул. Южная 27а, 110100, г. Навои, Узбекистан), e-mail: strong0185@mail.ru.

#### Information about the authors

*Juraev Rustam Umarkhanovich* – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Acting Professor of the Department of “Mining Electromechanics”, Navoi State Mining Institute (27a, Yujnaya Str., 110100, Navoi, Uzbekistan), e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru.

*Kakharov Sergey Karimovich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Dean of the Mining and Metallurgical Faculty, Almalyk branch of the National Research Technological University “MISiS” (56, Amir Temur Str., 110100, Almalyk, Uzbekistan), e-mail: misterksk79@mail.ru.

*Kologrivko Andrey Andreevich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Mining and Environmental Engineering, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kologrivko@tut.by.

*Mustafayev Oybek Bobomuradovich* – Senior Lecturer of the Department “Mining Electromechanics”, Navoi State Mining Institute (27a, Yujnaya Str., 110100, Navoi, Uzbekistan), e-mail: strong0185@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.04.2021 г.

УДК 66.047.69:622.331-662(045)(476)

**Березовский Н.И., Борисейко В.В., Костюкевич Е.К., Клименок М.В.***Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
РУКАВНЫХ ФИЛЬТРОВ В ТОРФОБРИКЕТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**Аннотация.** В работе рассмотрена методика проведения исследования рукавных фильтров на основании физико-механических свойств пылевоздушной смеси паровой трубчатой сушилки. Предложена математическая модель процесса пылеулавливания рукавными фильтрами.

**Ключевые слова:** рукавные фильтры, пылевоздушная смесь, степень очистки, температура газов, скорость смеси, размер частиц, факторный эксперимент.

**Berezovsky N.I., Boriseyko V.V., Kostyukevich E.K., Klimenok M.V.***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***DEVELOPMENT OF A TECHNIQUE FOR USE OF BAG FILTERS  
IN THE PEAT BRIQUETTING PRODUCTION**

**Abstract.** The paper discusses a methodology for studying bag filters based on the physical and mechanical properties of a dust-air mixture of a steam tube dryer. A mathematical model of the dust collection process by bag filters is proposed.

**Keywords:** bag filters, dust-air mixture, degree of purification, gas temperature, mixture velocity, particle size, factorial experiment.

**Введение.** Защита окружающей среды от загрязнения в современных условиях развития промышленности – одна из важнейших задач, стоящих в технической области. При переработке горных пород существенную опасность представляет породная пыль. Во-первых, это опасность для здоровья работников добывающих и перерабатывающих предприятий, когда риску подвергаются верхние и нижние дыхательные пути человека; во-вторых, взрывоопасность пыли большинства горных пород, что ставит под угрозу жизнь работающих людей, а также может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования. Поэтому борьба с пылью занимает одно из основных мест в общем комплексе работ по улучшению условий труда и повышению безопасности горных работ. Обеспыливание производится с целью защиты атмосферы от загрязнения пылью, содержащейся в воздушных выбросах предприятий, или для предотвращения загрязнения воздуха в помещениях пылью, содержащейся в атмосфере. И в том, и в другом случае вопросы обеспыливания воздуха тесно связаны с состоянием воздушного бассейна населенных пунктов, которое в значительной мере определяется уровнем очистки выбросов [1-3].

В современных условиях наметились следующие основные пути борьбы с вредными выбросами от стационарных источников: изменение или оптимизация технологического процесса для уменьшения выбросов; оснащение технологических агрегатов эффективными газоочистными и пылеулавливающими аппаратами; ликвидация источников вредных выбросов путем внедрения малоотходной или безотходной технологии. На основании вышеизложенного следует, что разработка технологии утилизации пылепаровоздушной смеси при комплексной переработке твердых ископаемых на торфо-

брикетных предприятиях является актуальной задачей и требует проведения научных исследований [4, 5].

#### **Результаты исследований.**

Торф является весьма перспективным источником получения тепловой и электрической энергии, более дешевой и экологичной, чем при использовании каменного угля или жидкого топлива.

До недавнего времени в торфяной промышленности для осаждения самых малых микрочастиц не применялись сухие способы, а только скрубберы, которые направляют часть тепла в шламовые пруды, а часть выбрасывают в атмосферу. Утилизация тепла после паровой трубчатой сушилки затруднена тем, что микрочастицы пыли постепенно налипают на внешней стенке труб бойлера и снижают теплообмен горячего воздуха. Очищенный влагостойким рукавным фильтром с предварительным динамическим очистителем горячий, сильно увлажненный воздух по изолированному воздуховоду осевым вентилятором нагнетается в бойлер нагрева воды, циркулирующей в его трубках.

На торфобрикетных предприятиях в настоящее время применяется как сухое, так и мокрое пылеулавливающее оборудование. Мокрая пылеочистка применяется, в основном, для обеспечения необходимых санитарно-гигиенических требований во избежание запыленности окружающей территории. Осажденная при этом пыль в виде шлама отводится в производственную канализацию. Назначение сухой пылеочистки – снизить потери высушенного материала и, тем самым, улучшить материальный баланс и повысить экономичность процесса сушки. Среди сухих способов очистки промышленных газов от пыли наибольшая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц (размером до 5 мкм) достигается практически только при использовании рукавных фильтров и электрофильтров.

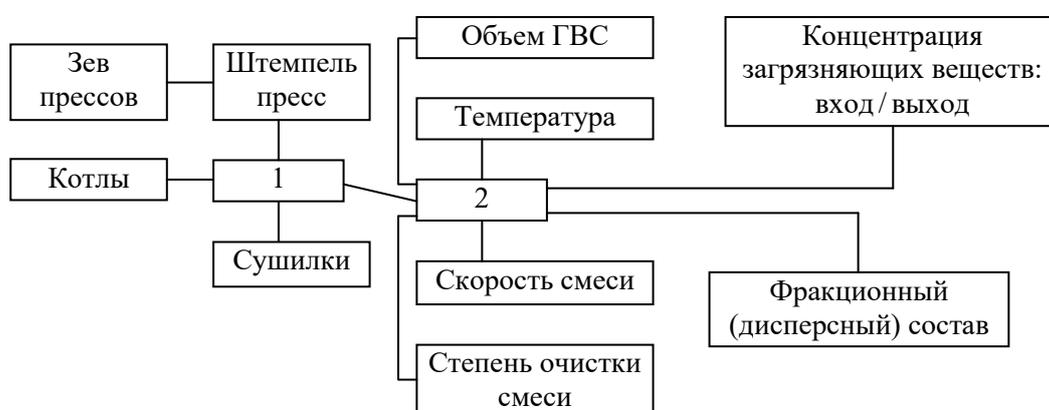
Фильтры рукавные (ФР) – это универсальный вид оборудования, предназначенный для очистки воздуха с температурой до +260 °С и исходной запыленностью до 1000 г/м<sup>3</sup>. Они относятся к группе высокоэффективных пылеуловителей «сухого типа». Применение ФР с высокой степенью очистки (до 99,9 %) позволит утилизировать пыль, являющуюся высококачественным сырьем, а также вторичные энергоресурсы – тепло (температура пылегазовой смеси 81÷100 °С) и воду, испаряемую из фрезерного торфа. Фильтр очистки воздуха устанавливают в аспирационные системы, пылеулавливающие установки и другие системы очистки воздуха для создания чистой атмосферы в помещениях различного назначения [6, 7].

Повышенная запыленность воздуха в прессовом отделении объясняется тем, что неудовлетворительно работает система отсоса от штемпелей и зевов прессов, т.к. конструкция заборных зонтов не обеспечивает качественного захвата запыленного потока. Кроме того, вследствие конденсации влаги на стенках трубопроводов налипают торфяная пыль, и отсос прекращает работать.

Циклоны, как наиболее простые в конструктивном исполнении, имеющие малую стоимость, по-прежнему представляют большой интерес для аспирационных систем. Применение тканевых фильтров позволит экономить воду и обеспечит эффективность очистки выше 99 %. Следует отметить, что выбросы оксида углерода при сжигании каменного угля (по сравнению с торфяными брикетами) превышают в 1,36 раза, а диоксида серы – в 6,1 раза. Что касается бурого угля: выбросы диоксида серы превышают в 2,7 раза, лишь выбросы оксида углерода бурого угля, наоборот, ниже значений выбросов от торфяных брикетов в 1,3 раза. Наряду с этим необходимо отметить, что выбросы твердых частиц при сжигании каменного угля в сравнении с выбросами от торфяных брикетов превышают в 2,7 раза, соответственно, бурого угля – в 1,98 раза. Эти явные

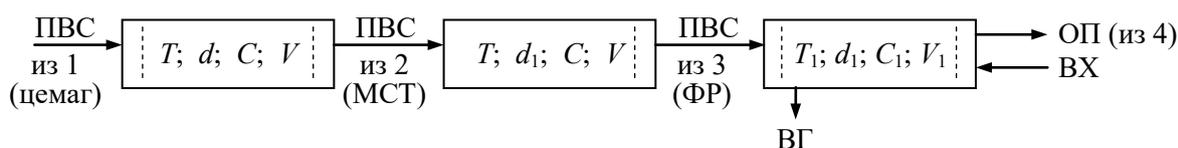
преимущества дают основания для успешной конкуренции на рынке твердых видов топлива [3, 5, 8].

На основании проведенного аналитического обзора разработана научно-методическая основа по проведению опытов для выбора сухого способа очистки воздуха на торфобрикетных заводах (ТБЗ). На рисунке 1 выделены два блока, на первом из которых показаны места исследования объектов ТБЗ, где можно получить наибольший эффект при аспирации паровоздушной смеси. Это сушилки, прессовые отделения, котлы, где проводится замер выброшенной пыли. Блок 2 характеризует исследуемые параметры газовой смеси (ГВС) на входе и выходе из каждого объекта. Это объем паровоздушной смеси (ПВС) или ГВС, ее температура, концентрация загрязняющих веществ на входе и выходе, фракционный (дисперсный) состав, скорость смеси и степень ее очистки.



1 – исследование концентрации загрязняющих веществ ГВС (замер выбросов пыли);  
 2 – исследуемые параметры ГВС на входе и выходе каждого объекта  
**Рисунок 1. – Методика проведения исследования ФР**

На рисунке 2 представлена структурная схема перемещения ПВС при производстве торфяных брикетов и установка рукавных фильтров, в которых обозначены основные опасные зоны, где наблюдается большее скопление пыли. Это паротрубчатая сушилка, трубопровод, ФР и теплообменник. В этой схеме нами рекомендуется установка ультразвукового магнестриктора (МСТ) с целью изменения фракционного состава пыли для увеличения КПД рукавных фильтров, а также использование теплообменника для эффективной работы данной системы для вторичного использования теплоты ПВС. Предварительные исследования показали, что средняя производительность сушилки  $Q = 25000 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура ПВС  $T = 80-100 \text{ }^\circ\text{C}$ , эффективность работы пылесадительной системы  $E = 92-96 \%$ , скорость ПВС  $V = 10-20 \text{ м/с}$ , фракционный состав  $d = 5-15 \text{ мкм}$  и концентрация смеси  $C = 10-40 \%$ .



ВХ – вода холодная; ВГ – вода горячая;  
 ОП – отработанная ПВ; ПВ – паровоздушная смесь  
**Рисунок 2. – Основные физико-механические свойства ПВС в зоне исследования**



Полный факторный эксперимент для трех факторов состоит из восьми опытов, где для уменьшения их количества нами применена полуреплика, которая сохраняет способность математически характеризовать изучаемый процесс. После проведения эксперимента дробные реплики и полного факторного эксперимента определялись коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N};$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j \cdot x_{ji}}{N},$$

где  $j$  – номер опыта;

$i$  – номера факторов;

$N$  – число опытов;

$y_j$  – среднеарифметическое значение выходного параметра в  $j$ -ом опыте;

$x_{ji}$  – значение  $i$ -го фактора в  $j$ -ом опыте.

Значения рассчитанных коэффициентов регрессии:  $b_0 = 93,0$ ,  $b_1 = 1,2$ ,  $b_2 = 1,1$ ,  $b_3 = 0,7$ .

Для серии опытов уравнение регрессии будет выглядеть следующим образом:

$$E = 93,0 - 1,2V + 1,1C + 0,7d,$$

где  $V$  – скорость смеси,

$C$  – концентрация смеси,

$d$  – размер частиц, которые изменяются от  $+1$  до  $-1$  (математическое значение).

Критерий Кохрена:  $C_0 = 0,25 < 0,39$ . Расчетный критерий Фишера меньше табличного:  $F_p < F_T - 2,17 < 4,07$ . Математическое планирование экспериментов проводилось по методике [9-11], где однородность дисперсии определялась по критерию Кохрена, расчетные значения критерия (0,25) после проведения опытов оказались меньше теоретического (0,39). После проведения экспериментов дробные реплики коэффициенты уравнения регрессии определялись с одинаковой погрешностью  $b \geq s \cdot t$ , где  $s$  – дисперсия коэффициентов,  $t$  – значение критерия Стьюдента. Уравнение регрессии проверялось по критерию Фишера на адекватность. Расчетное значение критерия равно 21,7, табличное значение – 4,07, что соответствует адекватности модели.

Дополнительное применение ультразвуковых колебаний (УЗК) на частицы пыли позволит улавливать практически всю образующуюся после сушки пыль. Таким образом, разработанная структурная схема показывает комплексный подход технологического процесса утилизации пыли, тепла и влаги, а использование УЗК позволит изменить гранулометрический состав ПВС, что приведет к повышению КПД рукавных фильтров (рисунок 4).

#### **Заключение.**

1. На основании факторного эксперимента разработана методика эффективного использования рукавных фильтров при производстве торфяных брикетов в зонах сушки сырья и формования брикетов.

2. Установлено, что эффективность очистки газоочистных установок существующих ТБЗ составляет, соответственно: штемпелей брикетных прессов –  $95,3 \div 99,75$  %; зевов брикетных прессов –  $88,7 \div 94,62$  %; сушилок –  $92,96 \div 99,85$  %.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена высокая эффективность утилизации торфяной пыли с применением рукавных фильтров, а также выявлены эмпирические зависимости оптимальных параметров газоочистных установок.

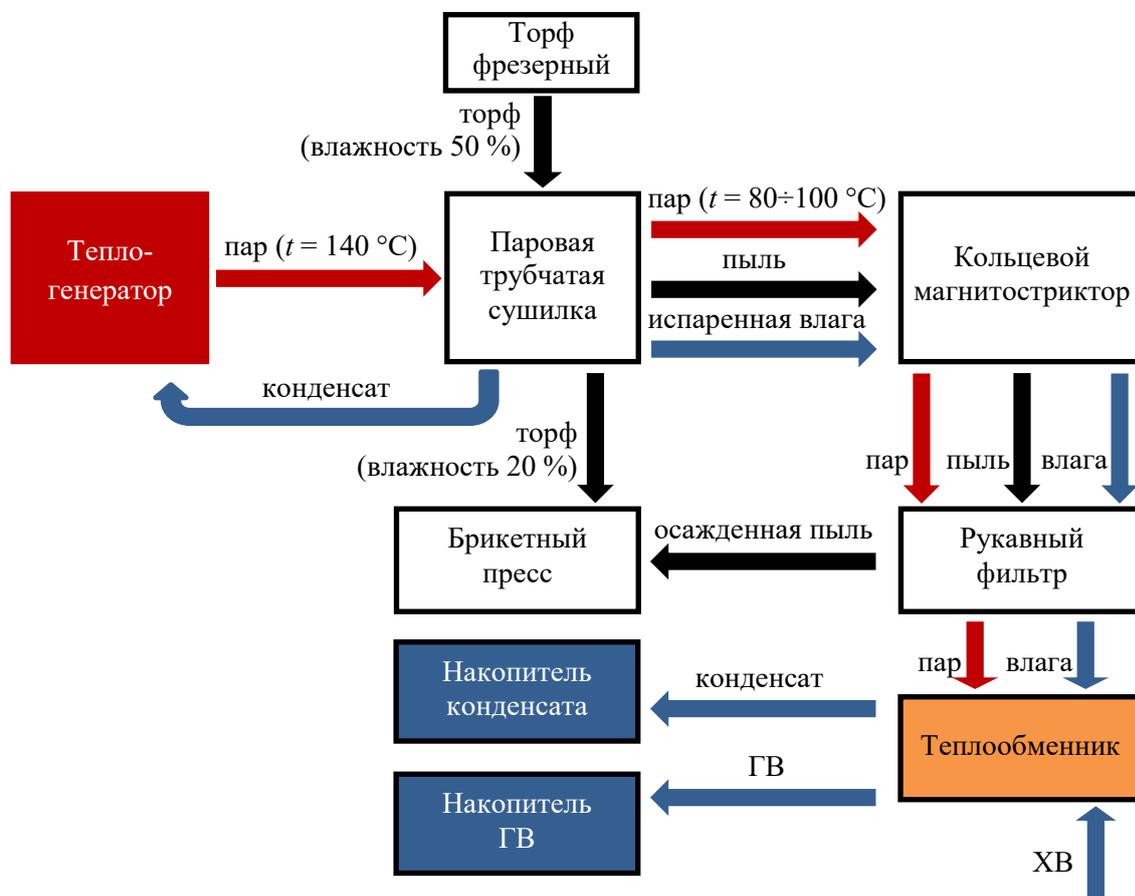


Рисунок 4. – Структурная схема технологического процесса утилизации пыли, тепла и влаги

3. Методом ортогонального композиционного планирования эксперимента получена математическая модель, связывающая эффективность аспирации ПВС с ее скоростью перемещения, концентрацией смеси и фракционным составом. Полученные коэффициенты определяют положительное влияние концентрации смеси и фракционного состава (+1,1 и +0,7) и отрицательное – скорости смеси (-1,2).

4. Разработана схема технологического процесса утилизации пыли, тепла и влаги с производительностью 25 тыс. м<sup>3</sup>/ч и установкой ФР фильтрующей поверхностью 180 м<sup>2</sup>, позволяющая увеличивать КПД очистительной системы ТБЗ и улучшить ее экономические показатели.

5. Разработан комплексный подход по усовершенствованию аспирационных систем в технологии производства торфяных брикетов, позволяющих экономить ресурсы торфа, воды, тепла и электроэнергии. Гранулометрический состав измельченных материалов обуславливает ряд его физических свойств и служит основанием для решения вопросов энергосбережения в технологических процессах обогащения.

6. По заданной производительности ( $Q = 12000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) и с учетом оптимальной удельной нагрузки на ткань ( $2 \div 3 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ ) определены основные параметры газоочистных установок штемпелей прессов, выбран рукавный циклонный фильтр марки

ЛМ 52/35, вентилятор марки JK-45K, обороты колеса  $n_k = 1950$  об/мин, привод электродвигателя марки IP 55 мощностью  $N = 18,5$  кВт. При этом рабочее давление вентилятора, работающего на разрежение, может достигать  $p = 3400$  Па.

7. Получена математическая модель процесса пылеулавливания рукавных фильтров (выходного параметра – допустимых выбросов в атмосферу, влияющих переменных – концентрации пыли на входе в рукавный фильтр, производительности по пылегазовому потоку и давления разрежения).

8. Полученные экспериментальным путем результаты исследований подтверждают применение рукавных фильтров для более эффективного осаждения торфяной пыли после газоочистных установок штемпелей и зевов брикетных прессов. Выявленные вторичные энергоисточники после паротрубчатой сушилки требуют разработки комплексной технологии утилизации пыли, тепла и испаренной влаги при производстве торфяных брикетов с возможным использованием рукавных фильтров.

9. Разработана методика эффективного использования рукавных фильтров при производстве торфяных брикетов в зонах сушки сырья и формования брикетов.

#### Список использованных источников

1. Наумович, В.М. Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов / В.М. Наумович. – М.: Недра, 1971. – 279 с.
2. Кислов, Н.В. Пневматический транспорт торфяного производства / Н.В. Кислов. – Минск, 1985. – 80 с.
3. Самсонов, В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности: методы и средства / В.Т. Самсонов. – М.: Инфра-М, 2016. – 232 с.
4. Физико-химические основы технологии торфяного производства / И.И. Лиштван [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1983. – 232 с.
5. Гордон, Г.М. Пылеулавливание и очистка газов / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов. – М.: Металлургия, 1964. – 499 с.
6. Березовский, Н.И. Повышение конкурентоспособности торфяных брикетов через усовершенствованные аспирационные системы в их технологии производства / Н.И. Березовский, В.В. Борисейко // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 18-27.
7. Березовский, Н.И. Энергосберегающие аспирационные системы паротрубчатых сушилок для производства топливных брикетов / Н.И. Березовский, В.В. Борисейко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 31-36.
8. Березовский, Н.И. Экологические и экономические аспекты использования инновационных аспирационных систем в торфяной промышленности / Н.И. Березовский, В.В. Борисейко // Природопользование: сб. науч. тр. / ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси». – Минск, 2018. – Вып. 1 – С. 224-237.
9. Разработка алгоритмов для управления производственными технологиями: монография / Н.И. Березовский [и др.]. – Минск: БИП-С Плюс, 2011. – 100 с.
10. Богатов, Б.А. Математические методы в торфяном производстве / Б.А. Богатов, В.Д. Копенкин. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
11. Воронова, Н.П. Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.

**Информация об авторах**

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

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

*Костюкевич Елена Казимировна* – доцент кафедры «Горные машины», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: kafgormash@gmail.com.

*Клименок Маргарита Викторовна* – студент факультета горного дела и инженерной экологии, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь), e-mail: MargaritaKlimenok@mail.ru.

**Information about the authors**

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

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

*Kostyukevich Elena Kazimirovna* – Associate Professor “Mining machinery” Faculty, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: kafgormash@gmail.com.

*Klimenok Margarita Viktorovna* – Student of the Faculty of Mining and Environmental Engineering, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: MargaritaKlimenok@mail.ru.

Поступила в редакцию 26.03.2021 г.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.837.2(045)

**Громько П.Н.<sup>1</sup>, Хатетовский С.Н.<sup>1</sup>, Макацария Д.Ю.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь*<sup>2</sup>*Учреждение образования «Могилевский институт Министерства внутренних дел Республики Беларусь», г. Могилев, Беларусь***СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ПЕРЕДАЧИ ДВИЖЕНИЯ НА ВЫХОДНОЕ ЗВЕНО В ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧАХ ТИПА К-Н-V**

**Аннотация.** В статье рассматривается одно из направлений снижения механических потерь в передачах, которое заключается в совершенствовании эксплуатационных характеристик. Выделены факторы, от которых зависит КПД эксцентриктовых передач. Выбран способ передачи движения с сателлита на выходное звено. На основе трансформации кинематической схемы эксцентриктовой передачи проведена оценка КПД аналитическим методом. Составлены и проанализированы схемы движения звеньев механизма, а также уравнения движения. Проведены расчеты численных значений КПД в зависимости от различных значений коэффициента трения. Выполнена оценка эксцентриктовой передачи методами компьютерного моделирования. Предложены направления совершенствования конструкции передачи эксцентриктового типа.

**Ключевые слова:** выходное звено, компьютерное моделирование, КПД, механизм, механическая потеря, мощность, оценка, процесс передачи движения, сателлит, совершенствование, эксцентриктовая передача.

**Gromyko P.N.<sup>1</sup>, Khatetovsky S.N.<sup>1</sup>, Makatsaryia D.Yu.<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus*<sup>2</sup>*Mogilev Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus, Mogilev, Belarus***IMPROVEMENT OF MECHANISM OF MOTION TRANSFER TO OUTPUT LINK IN ECCENTRIC TRANSMISSIONS OF K-H-V TYPE**

**Abstract.** The article discusses one of the areas of reduction of mechanical losses in gears, which consists in improvement of performance. The factors on which the efficiency of eccentric gears depends are highlighted. Method of motion transfer from satellite to output link is selected. Based on the transformation of the kinematic scheme of eccentric transmission, the efficiency was evaluated by an analytical method. The motion patterns of the mechanism links, as well as the equations of motion, were compiled and analyzed. Calculations of numerical values of efficiency are carried out depending on different values of friction coefficient. Evaluation of eccentric transmission by computer simulation methods was performed. Directions of improvement of eccentric type transmission design are proposed.

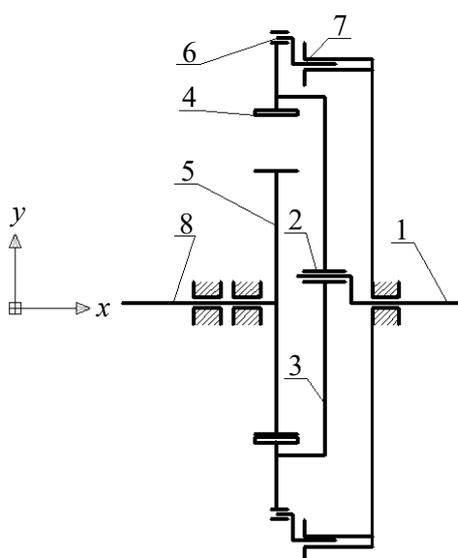
**Keywords:** output link, computer modeling, efficiency, mechanism, mechanical loss, power, estimation, motion transmission process, satellite, improvement, eccentric transmission.

**Введение.** Эксцентриктовые передачи типа К-Н-V в настоящее время производятся многими известными фирмами. На основе этих передач возможно создание малогабаритных приводных редуцирующих устройств с низкими значениями механических

потерь мощности. Однако высокая цена, обусловленная использованием специальных материалов, видов термомеханической обработки, оборудования и инструмента, часто делает нерациональным применение рассматриваемых передач в приводах различных машин и механизмов. Снижение технологического уровня изготовления редукторов на основе традиционных эксцентриковых передач типа К-Н-V, безусловно, приводит к снижению себестоимости, но также обуславливает увеличение механических потерь.

Снижение себестоимости эксцентриковых передач может быть достигнуто в том случае, если их эксплуатационные характеристики, в том числе КПД, будут мало зависеть от технологического уровня производства.

Одним из основных факторов, от которого зависит КПД рассматриваемых передач, является способ передачи движения с сателлита на выходное звено. В традиционных вариантах используется в основном механизм «параллелограмма», который преоб-



1 – входной вал; 2 – эксцентрик входного вала; 3 – сателлит; 4 – сателлитное зубчатое колесо; 5 – центральное зубчатое колесо; 6 – эксцентрик оси; 7 – вал-ось; 8 – выходной вал

Рисунок 1. – Кинематическая схема механической передачи эксцентрикового типа с поступательным движением сателлита

Входной вал 1 приводит во вращение эксцентрик 2, который, в свою очередь, вместе с эксцентриком 6 вала-оси 7 обеспечивает поступательное движение сателлита 3. На сателлите 3 расположено зубчатое колесо 4, которое взаимодействует с центральным колесом 5 выходного вала 8.

#### Оценка КПД эксцентриковой передачи аналитическим методом.

Проведем анализ механических потерь в предложенном варианте эксцентриковой передачи. Для этого сначала обратимся к рисунку 2. На этом рисунке представлена схема взаимодействия звеньев.

Диаметры эксцентриков валов-осей условно приняты равными нулю. При этом взаимодействие эксцентрика вала-оси с сателлитом сводится к контакту геометрической оси первого и цилиндрической поверхности отверстия второго. Эту цилиндрическую поверхность описывает геометрическая ось вала-оси при движении относительно сателлита.

разует плоскопараллельное движение сателлита во вращательное движение выходного звена. По данным литературных источников [1] механические потери в этом механизме составляют значительную часть механических потерь всей передачи.

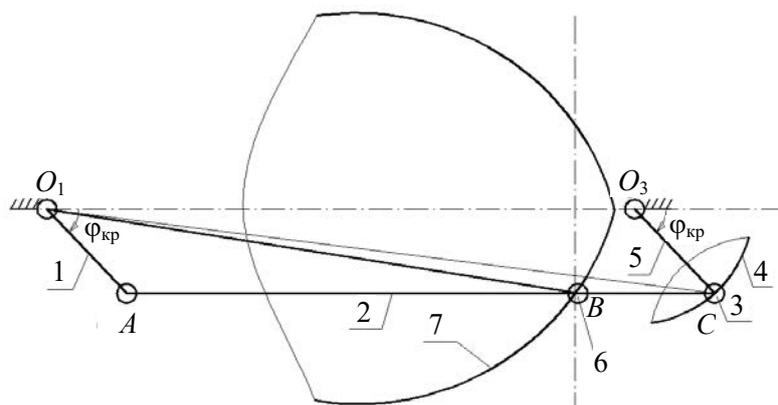
Таким образом, совершенствование механизма передачи движения с сателлита на выходное звено с целью снижения механических потерь может являться тем направлением развития эксцентриковых передач типа К-Н-V, которое приведет к снижению себестоимости их изготовления.

Для достижения поставленной цели произведем следующую трансформацию кинематической схемы эксцентриковой передачи типа К-Н-V (рисунок 1).

В предлагаемой кинематической схеме вместо плоскопараллельного движения заложено поступательное движение сателлита. Это позволяет оптимизировать зависимость потерь на трение в механизме передачи движения на выходное звено путем выбора геометрических параметров самого механизма.

Входной вал 1 приводит во враще-

Вместо профиля зуба сателлитного колеса условно рассматривается фиксированная на сателлите точка, в движении относительно центрального колеса описывающая некоторый профиль, принимаемый за профиль зуба центрального колеса. Таким образом, реальный контакт зубьев сводится к условному контакту прямой, проведенной через некоторую фиксированную точку сателлитного колеса, и цилиндрической поверхности, которую формирует указанная прямая.



1 – входной кривошип; 2 – шатун; 3 – геометрическая ось вала-оси; 4 – отверстие сателлита; 5 – кривошип; 6 – условная точка контакта зубьев сателлитного и центрального колес; 7 – условный профиль зуба центрального колеса

Рисунок 2. – Схема для определения соотношений геометрических параметров звеньев в эксцентриковой передаче с поступательным движением сателлитного звена

Механические потери мощности в зацеплении эксцентриковой передачи оцениваются по сумме мощности, затраченной на преодоление сил трения в условной точке  $C$  контакта эксцентрика вала-оси и сателлита, а также мощности, затраченной на преодоление сил трения в зацеплении, т.е. в условной точке  $B$  контакта зубьев сателлитного и центрального колес.

На основе зависимостей [2] получена формула для расчета значения КПД:

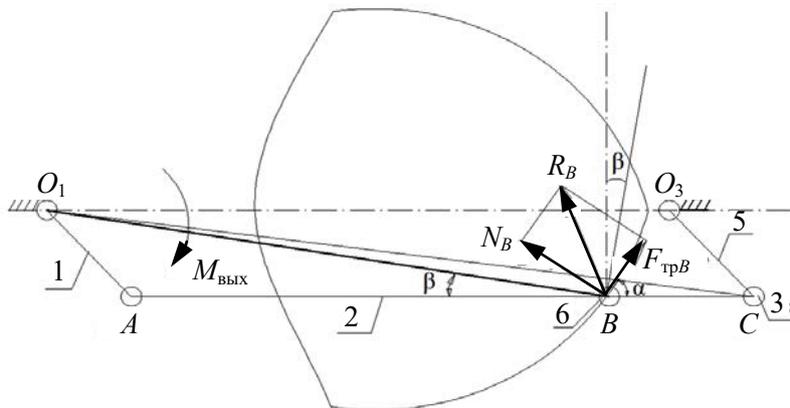
$$\varepsilon = 1 - \frac{F_{\text{тр}C} \cdot e \cdot \omega_{\text{кр}} + F_{\text{тр}B} \cdot \omega_{\text{кр}} \cdot \sqrt{e^2 + (r_B^2 / z^2) + 2 \cdot e \cdot (r_B / z) \cdot \cos(\varphi_{\text{кр}} + (\varphi_{\text{кр}} / z))}}{M_{\text{вых}} \cdot \omega_{\text{кр}}},$$

где  $F_{\text{тр}C}$  – сила трения в точке  $C$ ;  
 $e$  – эксцентриситет, равный  $O_1A$  и  $O_3C$ ;  
 $\omega_{\text{кр}}$  – угловая скорость кривошипов  $O_1A$  и  $O_3C$ ;  
 $F_{\text{тр}B}$  – сила трения в точке  $B$ ;  
 $r_B$  – расстояние, определяющее длину  $AB$ ;  
 $z$  – число зубьев сателлитного колеса;  
 $\varphi_{\text{кр}}$  – угол поворота кривошипов  $O_1A$  и  $O_3C$ ;  
 $M_{\text{вых}}$  – выходной момент.

Сила трения  $F_{\text{тр}B}$  определяется на основе схемы, представленной на рисунке 3. Составим уравнение моментов для звена  $O_1B$  относительно точки  $O_1$ . Из этого уравнения равновесия, в котором учтена сила  $R_B$  с составляющими  $F_{\text{тр}B}$  и  $N_B$ , следует, что

$$F_{\text{тр}B} = \frac{f_{\text{тр}B} \cdot M_{\text{вых}}}{\sqrt{e^2 + (r_B^2 / z^2) + 2 \cdot e \cdot (r_B / z) \cdot \cos(\varphi_{\text{кр}} + (\varphi_{\text{кр}} / z))} \cdot (f_{\text{тр}B} \cdot \sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta))},$$

где  $f_{\text{тр}B}$  – коэффициент трения в точке  $B$ .



1 – входной кривошип; 2 – шатун; 3 – геометрическая ось вала-оси; 5 – кривошип;  
6 – условная точка контакта зубьев сателлитного и центрального колес

Рисунок 3. – К определению силы трения  $F_{\text{тр}B}$

Сила трения  $F_{\text{тр}C}$  определяется на основе схемы, представленной на рисунке 4.

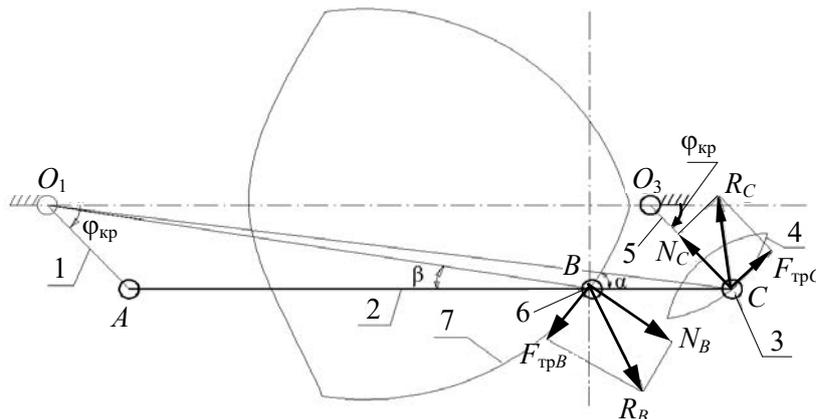
Составим уравнение моментов для звена  $AC$  относительно точки  $A$ . В этом уравнении равновесия учтены следующие силы: сила  $R_C$  с составляющими  $F_{\text{тр}C}$  и  $N_C$ , сила  $R_B$  с составляющими  $F_{\text{тр}B}$  и  $N_B$ .

Из этого уравнения равновесия следует, что

$$F_{\text{тр}C} = \frac{f_{\text{тр}C} \cdot F_{\text{тр}B} \cdot r_B \cdot (f_{\text{тр}B} \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)}{f_{\text{тр}B} \cdot r_C \cdot (\sin \varphi_{\text{кр}} + f_{\text{тр}C} \cdot \cos \varphi_{\text{кр}})},$$

где  $f_{\text{тр}C}$  – коэффициент трения в точке  $C$ ;

$r_C$  – расстояние между точками  $A$  и  $C$ .



1 – входной кривошип; 2 – шатун; 3 – геометрическая ось вала-оси;  
4 – отверстие сателлита; 5 – кривошип; 6 – условная точка контакта зубьев сателлитного и центрального колес; 7 – условный профиль зуба центрального колеса

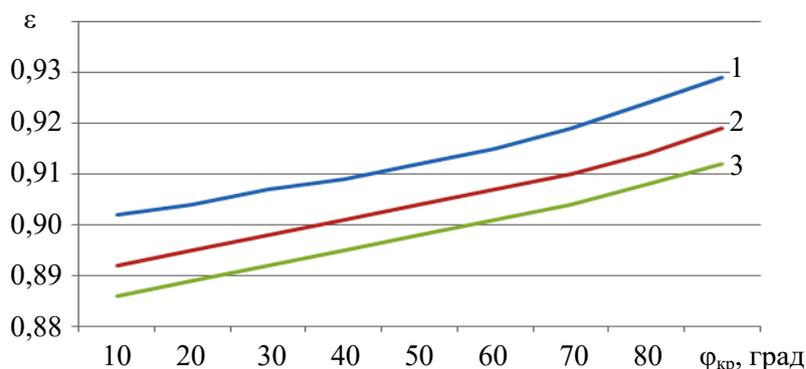
Рисунок 4. – Схема для определения силы трения  $F_{\text{тр}C}$

С учетом зависимостей сил трения в точках  $B$  и  $C$  КПД может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_{\text{тр}C} \cdot r_B \cdot (f_{\text{тр}B} \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)}{f_{\text{тр}B} \cdot r_C \cdot (\sin \varphi_{\text{кр}} + f_{\text{тр}C} \cdot \cos \varphi_{\text{кр}})} \cdot e + \frac{\sin(\alpha + \beta) \cdot \sqrt{e^2 + \frac{r_B^2}{z^2} + 2 \cdot e \cdot \frac{r_B}{z} \cdot \cos\left(\varphi_{\text{кр}} + \frac{\varphi_{\text{кр}}}{z}\right)}}{\sin(\alpha + \beta) + \cos(\alpha + \beta)} \cdot \frac{1}{\sin(\alpha + \beta) \cdot \sqrt{e^2 + r_B^2 + 2 \cdot e \cdot r_B \cdot \cos \varphi_{\text{кр}}}}$$

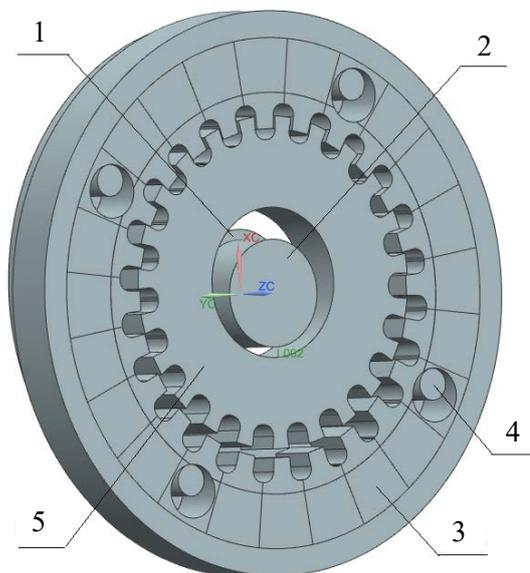
Данная формула показывает, что с ростом  $r_C$  КПД эксцентриковой передачи увеличивается. Это позволяет оптимизировать значение КПД путем выбора приемлемых с конструктивной точки зрения значений  $r_C$ .

Результаты численного анализа КПД, проведенного для конкретного варианта эксцентриковой передачи, представлены в виде графиков на рисунке 5.



1 – при коэффициенте трения 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,08

Рисунок 5. – Зависимости КПД от угла поворота кривошипа при различном коэффициенте трения в контакте эксцентрика вала-оси и сателлита



1 – входной вал; 2 – эксцентрик входного вала; 3 – сателлитное зубчатое колесо; 4 – эксцентрики валов-осей; 5 – центральное зубчатое колесо

Рисунок 6. – Вид компьютерной модели эксцентриковой передачи

При коэффициенте трения 0,01 среднее значение КПД составило 91,5 %, при коэффициенте трения 0,05 – 90,5 % и при коэффициенте трения 0,08 – 89,7 %.

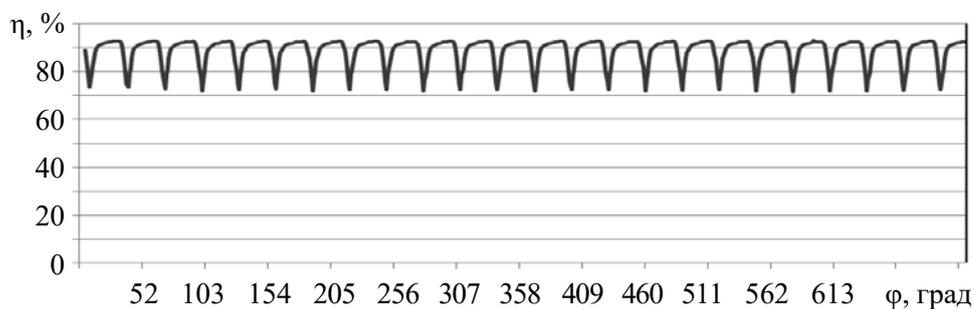
**Оценка КПД эксцентриковой передачи методами компьютерного моделирования.**

Исследование зубчатых передач методами компьютерного моделирования рассмотрено в работах [3, 4]. На рисунке 6 представлен вид компьютерной модели исследуемой эксцентриковой передачи.

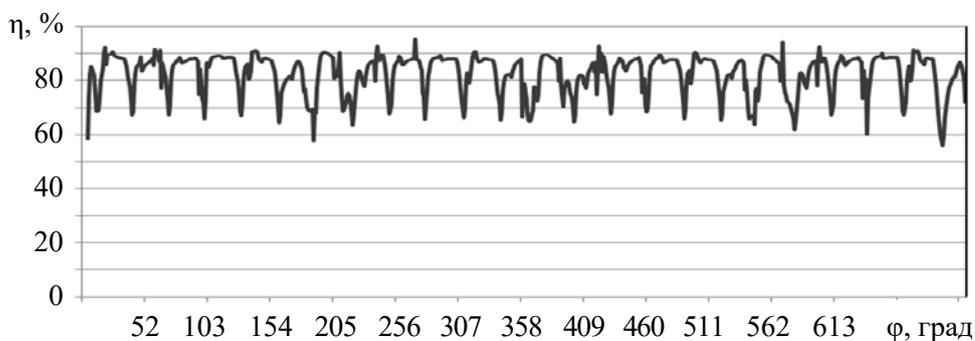
Результаты компьютерной оценки КПД представлены в виде графиков на рисунках 7-9.

Анализ графических зависимостей, представленных на рисунках 7-9, позволяет сделать следующие выводы. При сниже-

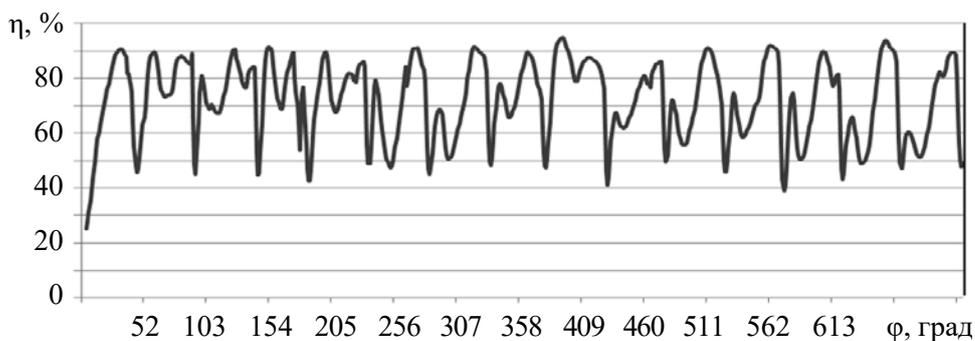
нии коэффициента трения в механизме передачи движения на выходное звено с 0,08 до 0,01 КПД увеличивается с 75 % до 90 %.



**Рисунок 7.** – Зависимость КПД эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала при значении коэффициента трения 0,01



**Рисунок 8.** – Зависимость КПД эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала при значении коэффициента трения 0,05



**Рисунок 9.** – Зависимость КПД эксцентриковой передачи от угла поворота входного вала при значении коэффициента трения 0,08

### **Выводы.**

КПД эксцентриковой передачи с поступательным движением сателлита при определенных геометрических параметрах механизма передачи движения на выходное звено выше, чем КПД эксцентриковой передачи, выполненной по традиционной кинематической схеме.

КПД эксцентриковой передачи с поступательным движением сателлита существенно зависит от коэффициента трения в механизме передачи движения на выходное звено. Путем выбора приемлемых с технической точки зрения коэффициентов трения можно достичь значений КПД порядка 90 %.

**Список использованных источников**

- 1 Колчин, Н.И. Механика машин: в 2 т. / Н.И. Колчин. – Л.: Машиностроение, 1971-1972. – Т. 2: Кинестатика и динамика машин. Трение в машинах. – 1972. – 456 с.
2. Шанников, В.М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В.М. Шанников. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
3. Gromyko, P.N. Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links / P.N. Gromyko, S.N. Khatetovsky // Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport” (AviaENT 2018), Irkutsk, Russia, May 21-26, 2018 / Irkutsk National Research Technical University, Belarusian-Russian University, Novosibirsk State Technical University; editor: A.S. Govorkov, et al. – Irkutsk, 2018. – Vol. 158. – P. 160-164.
4. Компьютерное моделирование планетарных прецессионных передач: монография / П.Н. Громько [и др.]; под общ. ред. П.Н. Громько. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – 271 с.

**Информация об авторах**

*Громько Петр Николаевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: grom\_7@tut.by.

*Хатетовский Станислав Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212005, г. Могилев, Беларусь), e-mail: mechlab@yandex.ru.

*Макацария Денис Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные дороги» Белорусско-Российского университета, заместитель начальника кафедры Могилевского института МВД (ул. Крупской, 67, г. Могилев, Беларусь), e-mail: dexteru@mail.ru.

**Information about the authors**

*Gromyko Petr* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the department “Metal-cutting machine-tools and instruments”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: grom\_7@tut.by.

*Khatetovsky Stanislav* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the department “Metal-cutting machine-tools and instruments”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212005, Mogilev, Belarus), e-mail: mechlab@yandex.ru.

*Makatsaryia Dzianis* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the department “Automobile roads”, Belarusian-Russian University, Deputy Head of the department of Mogilev Institute of Internal Affairs, (67, Krupskaya Str., Mogilev, Belarus) e-mail: dexteru@mail.ru.

Поступила в редакцию 01.04.2021 г.

УДК 621.793.044(045)(476)

**Довгалев А.М.***Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО  
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО НАКАТЫВАНИЯ**

**Аннотация.** *Представлена методика выбора параметров комбинированного инструмента и рациональных режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания поверхностей нежестких ферромагнитных деталей, учитывающая взаимосвязь кинематических характеристик движения деформирующих шаров в магнитном поле с качественными характеристиками обработки. Разработанная методика является основой для автоматизации проектирования технологий (операций) совмещенной отделочно-упрочняющей обработки и позволяет существенно сократить время на их разработку.*

**Ключевые слова:** *совмещенное упрочнение, накатывание, деформирующие шары, магнитная система, зубчатый магнитопровод, постоянный магнит, ферромагнитная деталь, поверхностный слой, шероховатость поверхности.*

**Dovgalev A.M.***Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus***DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE COMBINED  
MAGNETIC-DYNAMIC ROLLING PROCESS**

**Abstract.** *The paper presents a methodology for selecting the combined tool parameters and rational modes of combined magnetodynamic rolling of surfaces of non-rigid ferromagnetic components taking into account the relationship between the kinematic characteristics of the movement of deforming balls in a magnetic field and the quality characteristics of treatment. The developed methodology is intended to be used as a basis for computer-aided design of technologies (operations) of combined finishing and strengthening treatment and helps significantly reduce the time spent on their development.*

**Keywords:** *combined treatment, rolling, deforming balls, magnetic system, toothed magnetic core, permanent magnet, ferromagnetic component, surface layer, surface roughness.*

**Введение.** Исследование методов упрочняющей обработки при изготовлении деталей машин позволяет многократно увеличить ресурс оборудования, применяемого в горнодобывающей отрасли [1, 2].

В машиностроении достаточно широкое применение находят статические и динамические методы поверхностного пластического деформирования, обеспечивающие высокие качественные характеристики и эксплуатационные свойства упрочненных поверхностей [3].

В последние годы созданы методы упрочнения, обеспечивающие комплексное энергетическое воздействие на поверхностный слой обрабатываемой ферромагнитной детали. К их числу относится метод совмещенного магнитно-динамического накатывания (СМДН), при котором на поверхность ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и колеблющимися деформирующими шарами, осуществляющими импульсно-ударное деформирование [4, 5].

Метод СМДН обеспечивает получение на ферромагнитных деталях машин антифрикционного наноструктурированного поверхностного слоя, характеризующегося высокими эксплуатационными свойствами [6, 7].

Однако в настоящее время не существует общей методики проектирования технологий (операций) СМДН, позволяющей выбирать рациональные параметры инструмента и режимы процесса совмещенного упрочнения для обеспечения требуемого качества поверхностного слоя ферромагнитных деталей без проведения большого объема дополнительных экспериментальных исследований. Это не позволяет осуществлять автоматизацию проектирования технологий СМДН и сдерживает внедрение разработанного метода совмещенной отделочно-упрочняющей обработки на предприятиях машиностроения.

### Методика определения основных рациональных параметров комбинированного инструмента и режимов процесса СМДН.

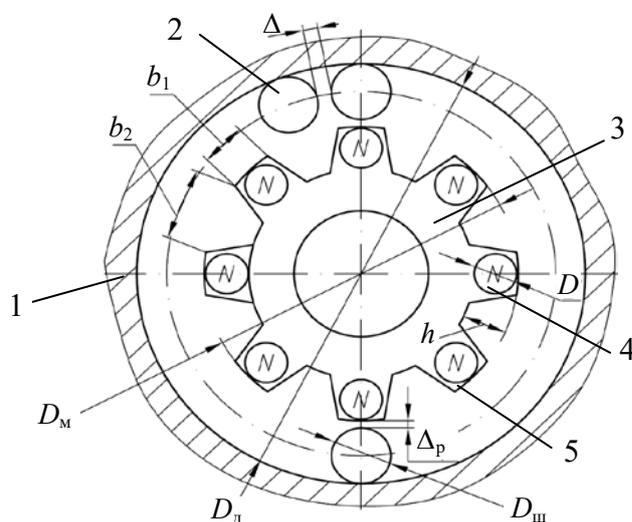
Для устранения указанного недостатка разработана методика определения основных параметров инструмента и режимов процесса СМДН, предусматривающая последовательное выполнение следующих этапов.

**1. Выбор основных параметров комбинированного инструмента** осуществляется в соответствии с расчетной схемой, на которой упрощенно изображено поперечное сечение ферромагнитной детали и комбинированного инструмента (рисунок 1).

**Диаметр деформирующих шаров.** При выборе диаметра деформирующих шаров следует учитывать диаметральные размеры внутренней цилиндрической поверхности обрабатываемой заготовки, позволяющие разместить в их пределах деформирующие ферромагнитные шары и магнитную систему инструмента. Так при СМДН поверхности отверстий диаметром 40-80 мм приемлемыми являются диаметры деформирующих шаров от 6 до 10 мм. При обработке отверстий диаметром 80-200 мм и более целесообразно использовать шары диаметром 10-30 мм. При упрочнении заготовок из пластичных материалов (твердостью до 30 HRC) следует выбирать деформирующие шары большего диаметра, а при обработке поверхностей термоупрочненных заготовок (более твердых) –

шары наименьшего диаметра из указанных диапазонов. Это обусловлено тем, что при уменьшении диаметра деформирующего шара обеспечивается увеличение удельного давления в зоне контакта с поверхностью ферромагнитной детали, что повышает интенсивность процесса поверхностного пластического деформирования.

**Радиальный зазор между ферромагнитным деформирующим шаром, магнитной системой инструмента и обрабатываемой поверхностью детали.** Рациональная величина зазора  $\Delta_p$  между деформирующим шаром и магнитной системой при работе инструмента (когда ферромагнитные деформирующие шары взаимодействуют с упрочняемой поверхностью детали) составляет от 2 до 6 мм и зависит от характеристик магнитной системы. При зазоре



- 1 – ферромагнитная деталь; 2 – ферромагнитные деформирующие шары комбинированного инструмента; 3 – зубчатый магнитопровод; 4 – цилиндрический постоянный магнит; 5 – зуб магнитопровода

Рисунок 1. – Расчетная схема для выбора основных рациональных параметров комбинированного инструмента при СМДН внутренней поверхности нежестких ферромагнитных тел вращения

более 6 мм имеет место рассеивание магнитного поля и уменьшение силового взаимодействия деформирующего шара с магнитной системой, что приводит к снижению интенсивности процесса поверхностного пластического деформирования. При радиальном зазоре менее 2 мм снижается динамическое воздействие деформирующих шаров на упрочняемую поверхность, и увеличивается их ударное воздействие на элементы магнитной системы инструмента. В результате снижается эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки, и уменьшается долговечность инструмента.

*Количество деформирующих шаров.* Длина окружности  $L$ , на которой расположены центры деформирующих шаров комбинированного инструмента при их взаимодействии с упрочняемой цилиндрической поверхностью ферромагнитной детали, равна:

$$L = \pi \cdot (D_d - D_{ш}), \quad (1)$$

где  $D_d$  – диаметр обрабатываемого отверстия;

$D_{ш}$  – диаметр шара.

Максимальное количество деформирующих шаров  $Z$ , устанавливаемых в инструменте при отсутствии зазора между ними:

$$Z = \frac{\pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}}. \quad (2)$$

Необходимая величина суммарного зазора  $\Delta_{\Sigma}$  между деформирующими шарами инструмента:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta \cdot Z = \Delta \cdot \frac{\pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}}, \quad (3)$$

где  $\Delta$  – зазор между деформирующими шарами (2-5 мм).

Длина окружности расположения геометрических центров  $L'$  деформирующих шаров инструмента с учетом наличия зазора между ними:

$$L' = L - \Delta_{\Sigma} = \pi(D_d - D_{ш}) - \frac{\Delta \cdot \pi(D_d - D_{ш})}{D_{ш}} = \pi(D_d - D_{ш}) \left(1 - \frac{\Delta}{D_{ш}}\right). \quad (4)$$

Определяем необходимое количество деформирующих шаров инструмента  $Z'$  при обеспечении зазора между ними:

$$Z' = \frac{L'}{D_{ш}} = \frac{\pi(D_d - D_{ш}) \left(1 - \frac{\Delta}{D_{ш}}\right)}{D_{ш}}. \quad (5)$$

*Диаметр зубчатого магнитопровода.* Диаметр зубчатого магнитопровода  $D_m$  в соответствии с расчетной схемой (рисунок 1) равен:

$$D_m = D_d - 2D_{ш} - 2\Delta_p = D_d - 2(D_{ш} + \Delta_p), \quad (6)$$

где  $\Delta_p$  – радиальный зазор между деформирующим шаром и магнитопроводом при работе инструмента.

*Число зубьев магнитопровода и их параметры.* Ширину  $b_1$  и высоту  $h$  зубьев магнитопровода следует принимать равными диаметру  $D$  цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов. Расстояние  $b_2$  между зубьями магнитопровода принимают больше или равным диаметру деформирующих шаров  $D_{ш}$ . Тогда запишем:

$$b_1 = D; \quad h = D; \quad b_2 \geq D_{\text{ш}}.$$

Наибольшее число зубьев магнитопровода  $Z''$  определяем из выражения:

$$Z'' = \frac{L_{\text{м}}}{b_1 + b_2}, \quad (7)$$

где  $L_{\text{м}}$  – длина окружности наружной поверхности зубчатого магнитопровода.

После подстановки значений, входящих в уравнение (7), имеем:

$$Z'' = \frac{\pi [D_{\text{д}} - 2(D_{\text{ш}} + \Delta_{\text{р}})]}{D + D_{\text{ш}}}. \quad (8)$$

Полученное расчетное значение  $Z''$  следует округлять до целого числа.

*Количество, диаметр и высота цилиндрических постоянных магнитов.* Количество цилиндрических постоянных магнитов  $n'$  целесообразно принимать равным числу зубьев  $Z''$  магнитопровода.

Диаметр  $D$  цилиндрических постоянных магнитов принимают равным ширине  $b_1$  зуба магнитопровода.

Высоту  $h_{\text{м}}$  применяемых цилиндрических постоянных магнитов из редкоземельных материалов (в соответствии с рекомендациями [8]) следует принимать не более диаметра  $D$  цилиндрического постоянного магнита:

$$h_{\text{м}} \leq D.$$

## 2. Определение режимов процесса СМДН.

*Определение подачи комбинированного инструмента.* Для обеспечения высококачественной отделочно-упрочняющей обработки поверхности детали поверхностным пластическим деформированием рекомендуется обеспечивать перекрытие на ней следов от деформирующих шаров в пределах от 1,5 до 8 раз [9].

Тогда максимальное  $S_{Z_{\text{max}}}$  и минимальное  $S_{Z_{\text{min}}}$  значения подачи инструмента составят:

$$S_{Z_{\text{max}}} \leq b/1,5, \quad (9)$$

$$S_{Z_{\text{min}}} \leq b/8, \quad (10)$$

где  $b$  – ширина следа от деформирующего шара.

Согласно зависимости взаимосвязи параметров отпечатка деформирующего шара на поверхности детали, глубина внедрения  $h_{\text{вн}}$  шара равна [10]:

$$h_{\text{вн}} \approx \frac{d^2}{4D_{\text{ш}}}, \quad (11)$$

где  $d$  – диаметр отпечатка деформирующего шара.

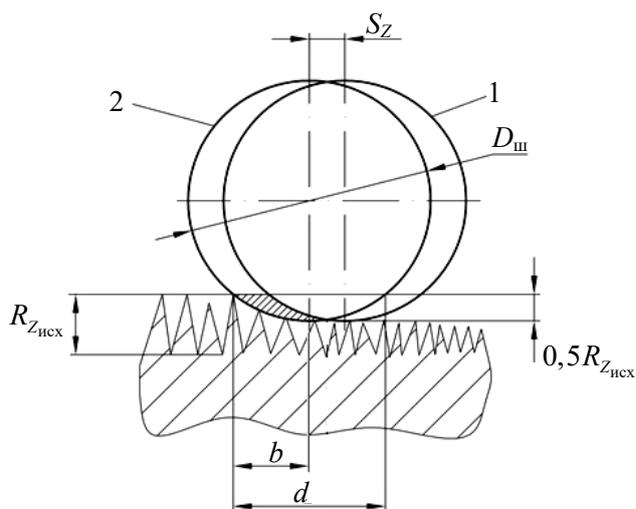
При отделочно-упрочняющей обработке с некоторым допущением считаем, что

$$h_{\text{вн}} \approx 0,5R_{Z_{\text{исх}}},$$

где  $R_{Z_{\text{исх}}}$  – исходная шероховатость поверхности детали по параметру  $R_z$ .

Тогда решая уравнение (11) относительно  $d$ , имеем:

$$d = 2\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{Z_{\text{исх}}}}, \quad (12)$$



1 – первоначальное положение образующей деформирующего шара; 2 – последующее положение образующей деформирующего шара  
 Рисунок 2. – Схема взаимодействия гладкого деформирующего шара с поверхностью ферромагнитной детали при СМДН

Согласно рисунку 2, с некоторым допущением (без учета упругого восстановления деформированных микронеровностей), ширину следа от деформирующего шара на поверхности детали принимаем равной:

$$b = d/2. \quad (13)$$

Подставляя значения (12) и (13) в уравнения (9) и (10), получим соответственно максимальное и минимальное значение подачи деформирующих шаров инструмента:

$$S_{z_{\max}} \leq \frac{\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{z_{\text{исх}}}}}{1,5}, \quad (14)$$

$$S_{z_{\min}} \leq \frac{\sqrt{0,5D_{\text{ш}} \cdot R_{z_{\text{исх}}}}}{8}. \quad (15)$$

Меньшее значение подачи комбинированного инструмента из

указанного диапазона принимается для упрочнения ферромагнитных деталей, требующих более высокого качества поверхностного слоя и низкой шероховатости поверхности.

*Определение требуемой скорости нормального удара  $V_n$  деформирующего шара по упрочняемой поверхности детали.* Необходимую скорость нормального удара  $V_n$  деформирующего шара по упрочняемой поверхности нежесткой ферромагнитной детали, при которой обеспечивается заданная чертежом шероховатость поверхности, определяем на основе решения соответствующего уравнения [11], устанавливающего взаимосвязь параметров качества обработки с режимами процесса СМДН.

*Определение требуемой частоты (скорости) вращения комбинированного инструмента.* Требуемую частоту вращения комбинированного инструмента, при которой обеспечивается необходимая скорость нормального удара  $V_n$  деформирующего шара по упрочняемой поверхности нежесткой детали, определяем на основе решения соответствующего дифференциального уравнения [12], устанавливающего взаимосвязь режимов процесса СМДН с кинематическими характеристиками деформирующих шаров.

**Заключение.** Разработана методика определения основных рациональных параметров комбинированного инструмента (диаметра и количества деформирующих шаров, диаметра и числа зубьев магнитопровода, размеров и количества цилиндрических постоянных магнитов) и режимов процесса совмещенного магнитно-динамического накатывания (величины подачи, скорости нормального удара деформирующих шаров, частоты вращения инструмента), имеющая важное научное и практическое значение. Методика является основой для разработки программного продукта, обеспечивающего существенное сокращение времени на технологическую подготовку производства на основе автоматизации проектирования технологий (операций) совмещенной отделочно-упрочняющей обработки.

**Список использованных источников**

1. Технология производства и ремонт горных машин: учебник / Р.П. Дидык [и др.]. – Днепропетровск: Пороги, 1996. – 440 с.
2. Дидык, Р.П. Проблемы и перспективы горного машиностроения / Р.П. Дидык // Горный журнал. – 1999. – № 6. – С. 16-17.
3. Энциклопедия поверхностного пластического деформирования / под. ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – 394 с.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюл. № 31. – 7 с.
5. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалев; заявитель А.М. Довгалев. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюл. № 25. – 7 с.
6. Довгалев, А.М. Повышение эффективности упрочнения поверхностей ферромагнитных деталей совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / А.М. Довгалев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 18-35.
7. Шелег, В.К. Исследование триботехнических свойств поверхностей деталей, упрочненных совмещенным магнитно-динамическим накатыванием / В.К. Шелег, А.М. Довгалев // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – Т. 7. – С. 330-334.
8. Свирепа, Д.М. Технологическое обеспечение качества внутренней цилиндрической поверхности деталей магнитно-динамическим раскатыванием: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Д.М. Свирепа; ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – Могилев, 2013. – 26 с.
9. Гуров, Р.В. Проектирование технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин с учетом их функционального назначения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / Р.В. Гуров. – Брянск, 2012. – 303 л.
10. Петросов, В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента / В.В. Петросов. – М.: Машиностроение, 1977. – 166 с.
11. Довгалев, А.М. Моделирование процесса деформирования поверхности детали гладким шаром при совмещенном магнитно-динамическом накатывании // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 1. – С. 5-13.
12. Довгалев, А.М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А.М. Довгалев. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.

**Информация об авторе**

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

**Information about the author**

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

Поступила в редакцию 22.02.2021 г.

УДК 622.251:622.674.22(045)

**Коднянко Е.В.<sup>1</sup>, Дворник А.П.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,  
г. Солигорск, Беларусь<sup>2</sup>Филиал Белорусского национального технического университета, г. Солигорск, Беларусь**АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ШАХТ И ЖЕСТКОЙ АРМИРОВКИ**

**Аннотация.** В результате неупорядоченных множественных замен изношенных проводников и расстрелов армировки происходит искривление осей проводников, которое приводит к образованию значительной неоднородности в показателях нагруженности и безопасности армировки по глубине ствола. В статье рассмотрены факторы, влияющие на искривление проводников. Построена диаграмма отклонений проводников от вертикали скипового отделения ствола № 2 1 РУ ОАО «Беларуськалий». Построены графики смещений между проводниками.

**Ключевые слова:** профиль проводника, шахтный ствол, армировка, направляющие, искривление, шахтная подъемная установка.

**Kadnianka A.V.<sup>1</sup>, Dvornik A.P.<sup>2</sup>**<sup>1</sup>JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, Soligorsk, Belarus<sup>2</sup>Branch of the Belarusian National Technical University, Soligorsk, Belarus**ANALYSIS OF TECHNICAL CONDITION OF INDICATORS  
OF VERTICAL MINES AND RIGID REINFORCEMENT**

**Abstract.** As a result of disordered multiple replacements of worn-out conductors and reinforcement buntons, the conductor axes are bent, which leads to the formation of significant heterogeneity in terms of loading and reinforcement safety along the borehole depth. The article discusses the factors affecting the curvature of conductors. A diagram is made of the deviations of the conductors from the vertical of the cage shaft № 2 of Mining Department № 1 of JSC “Belaruskali”. Graphs of displacements between conductors are plotted.

**Keywords:** profile of rail guides, mine shaft, reinforcement, guides, curvature, mine hoisting plant.

**Введение.** Армировка стволов предназначена для обеспечения направленного движения подъемных сосудов при заданных режимах работы подъемных установок [1]. Яруса жесткой армировки закреплены по всей глубине ствола с определенным шагом.

В результате неупорядоченных множественных замен изношенных проводников и расстрелов армировки происходит искривление осей проводников, которое приводит к образованию значительной неоднородности в показателях нагруженности и безопасности армировки по глубине ствола. Искривляясь в вертикальной плоскости, проводник влечет за собой деформирование крепи и армировки.

Кроме изменения вертикальности профиля проводника в процессе эксплуатации шахтных стволов происходит коррозионный и металлический износ элементов армировки. Характер износа проводников по всему сечению ствола различается в зависимости от приложенных контактных нагрузок (фрикционное взаимодействие на протяженном

участке ствола, ударно-циклическое, безударное с взаимодействием через роликовые направляющие).

**Основная часть.** Обеспечение безопасности движения подъемных сосудов с требуемой скоростью в таких случаях является достаточно сложной проблемой. Своевременная замена проводников и расстрелов предотвращает возникновение аварийных ситуаций. Такая ситуация требует проведения исследований влияния наиболее характерных случаев неоднородности параметров остаточных сечений металлоконструкций армировки на остаточные прочностные характеристики отдельного элемента (проводника или расстрела) и всего яруса в целом [2].

При движении подъемного сосуда по проводникам жесткой армировки его динамическая реакция на нарушения вертикальности их профилей, встречающихся по глубине ствола, зависит от следующих факторов:

- скорости движения сосуда;
- массы сосуда;
- смещения груза в сосуде от вертикальной оси каната;
- упруго-диссипативных свойств системы его направляющих устройств;
- кинематических зазоров в парах «предохранительный башмак – проводник»;
- шага армировки;
- геометрических параметров нарушения вертикальности профилей проводников [3, 4].

Яруса армировки рассчитаны на то, чтобы работать в одинаковых условиях нагружения и на одном уровне противостоять нагрузкам со стороны подъемных сосудов и околоствольного массива. Но уже в течение первых десяти лет эксплуатации в силу воздействия агрессивной среды, динамических нагрузок, сдвижения пород, неупорядоченных ремонтных работ образуется резко неоднородная по глубине ствола картина распределения уровней несущей способности элементов армировки – проводников и расстрелов.

Попадая на участки ствола, в которых резкие отклонения на смежных ярусах накладываются на относительно плавные искривления проводников, сосуд переходит в ударно-циклический режим взаимодействия с контактными нагрузками, достигающими в некоторых случаях 70-80 кН.

Прогиб проводника под нагрузкой от подъемного сосуда (для подъемов с интенсивностью 25-32 МДж) составляет в среднем 3-5 мм для коробчатых неискривленных проводников, при этом ударная нагрузка, передаваемая на ярус, находится в пределах 5-15 кН. В случае искривления проводников ударные нагрузки резко возрастают до 20-30 кН, а в некоторых случаях – до 60-75 кН [5-7]. Получив ударный импульс, сосуд движется от одного искривленного проводника к противоположному, передавая импульс ему, что приводит к раскачке сосуда с увеличивающейся амплитудой и к дальнейшему искривлению проводников. Эти искривления носят плавный характер и имеют большой радиус кривизны.

Проводники дискретно крепятся к расстрелам на ярусах в определенных точках. Каждый ярус может иметь местные отклонения от общей линии оси ствола до нескольких десятков миллиметров. Поэтому проводники имеют вид ломаной пространственной кривой с точками излома на ярусах.

Нагрузки, действующие на проводники перпендикулярно плоскости расстрелов, вызывают в них самые большие изгибные напряжения и являются причиной накопленных усталостных повреждений, расшатывания в крепи, чем создают предпосылки спонтанного возникновения аварии в стволе [8].

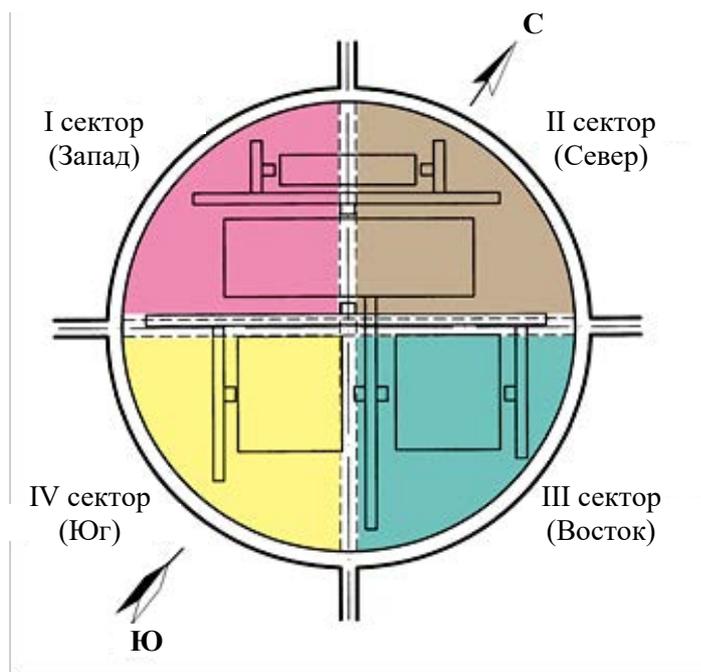


Рисунок 1. – Сечение ствола № 2  
1 РУ ОАО «Беларуськалий»

Движение подъемного сосуда по проводникам повторяет профиль пары проводников, так как все направляющие сосуда верхнего и нижнего поясов жестко связаны с проводниками посредством предохранительных башмаков скольжения и подпружиненных роликовых направляющих. Перемещаясь по проводникам, сосуд отслеживает трехроликовыми направляющими все отклонения от вертикали траектории движения нити проводников, а также изломы профиля на каждом ярусе.

Характерным для данного случая является ствол № 2 1 РУ ОАО «Беларуськалий» (рисунок 1).

Как видно из диаграммы (рисунок 2), все профили имеют знакопеременные искривления в большей или меньшей степени, отклоняясь от нулевой отметки в противоположных направлениях по всей глубине ствола.

На рисунке 3 представлено смещение проводников на различных ярусах армировки скиповых отделений рудоподъемного ствола.

Величина отклонений проводников от вертикали периодически контролируется на каждом ярусе с помощью маркшейдерских станций или с помощью отвесов. Согласно проекту ствола, взаимное боковое смещение одного проводника относительно другого не должно превышать 15 мм. При увеличении указанных зазоров свыше 15 мм направляющие либо их футерованные элементы подлежат замене.

Из приведенных графиков видно, что из-за нарушения геометрии ствола вертикальность системы проводников имеет незначительные нарушения – отклонения от проектной вертикали достигают от 15 мм до 19 мм на некоторых участках ствола.

Сравнение приведенных профилограмм показывает, что эксплуатационные нарушения вертикальности профилей проводников могут достигать одного уровня с нарушениями профилей в стволах, подверженных влиянию сдвижения горных пород.

Восстановление прямолинейности проводников при плановых ремонтных работах в боковой плоскости осуществляется путем их параллельного смещения вдоль несущих расстрелов с узлами закрепления без каких-либо принципиальных трудностей.

**Заключение.** Сокращение срока службы проводников на несколько лет по сравнению с проектным сроком происходит из-за влияния ряда причин: повышенных нагрузок, возникающих из-за перекоса сосуда при смещении центра тяжести груза; интенсивной коррозии под действием агрессивной шахтной среды.

Со временем прочностные параметры, характеризующие несущую способность армировки, приобретают неоднородный характер распределения по глубине ствола.

Исследование армировки показали множественные отклонения параметров от проектных значений и в некоторых областях переход в аварийную область.

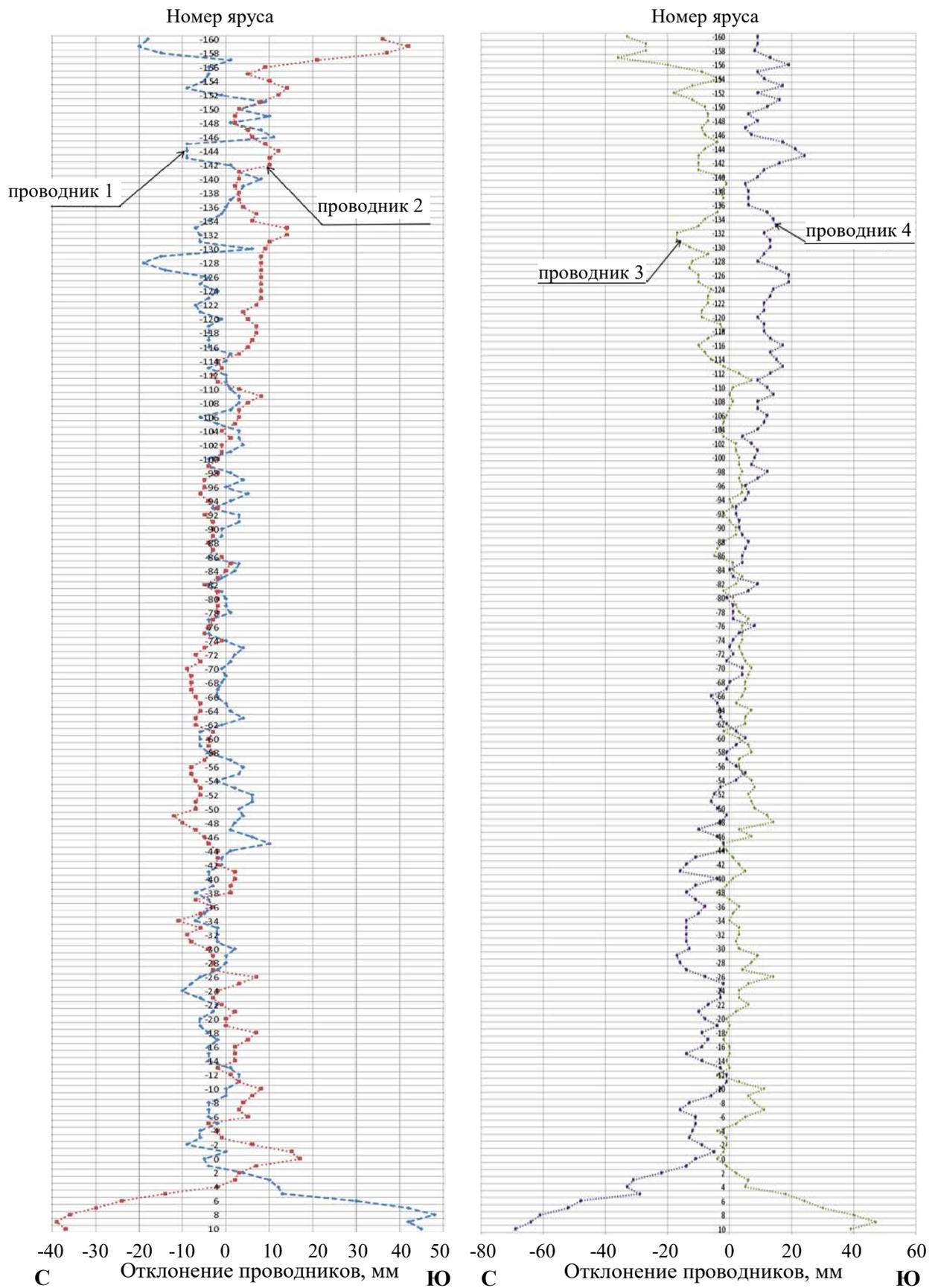


Рисунок 2. – Диаграмма отклонений проводников от вертикали скипового отделения

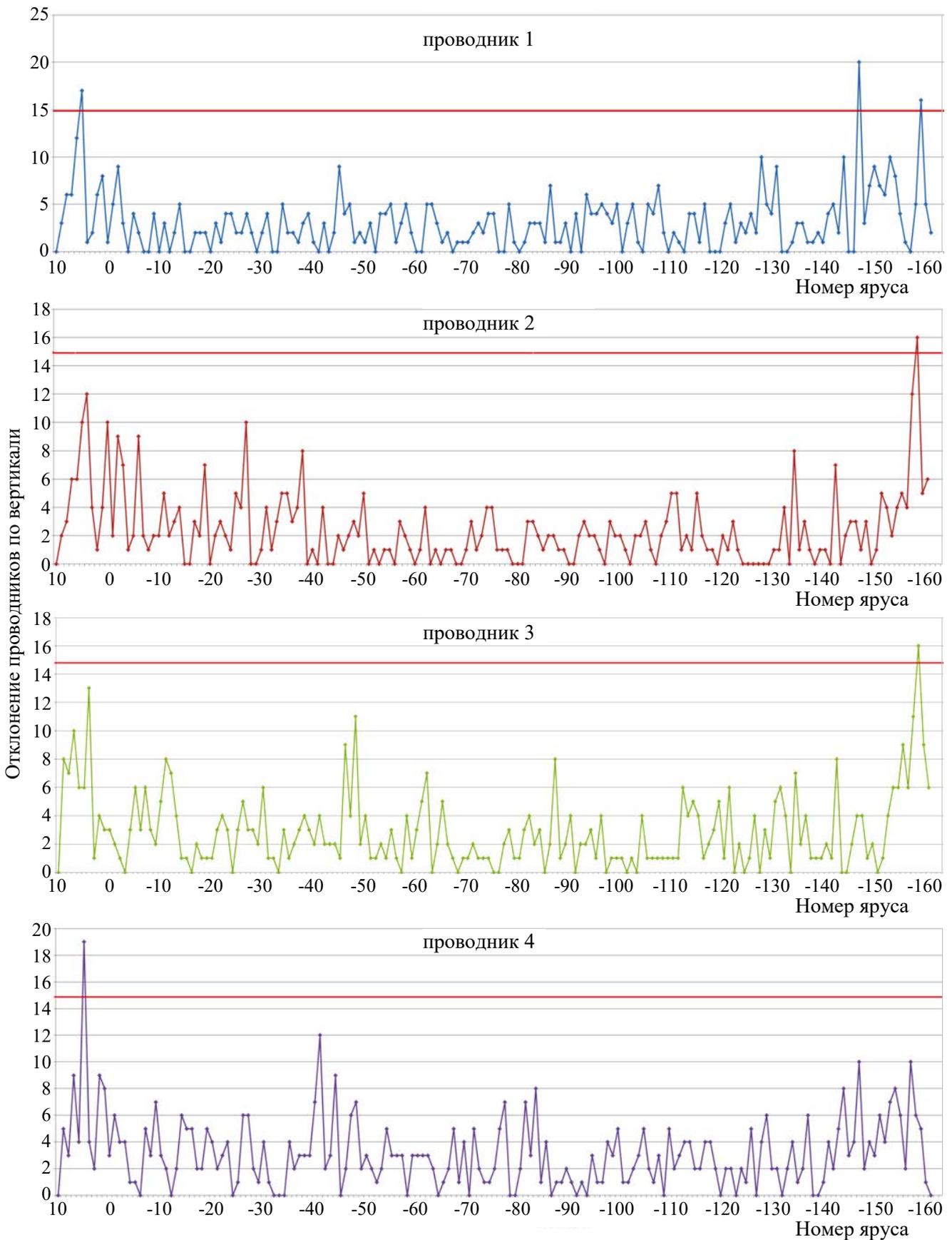


Рисунок 3. – Смещение между проводниками на различных ярусах армировки

---

**Список использованных источников**

1. Армирование вертикальных стволов шахт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geologam.ru/industry/shaft/armirovanie-vertikalnyh-stvolov-shaht>. – Дата доступа: 19.02.2021.
2. Ильин, С.Р. Влияние параметров износа жесткой армировки шахтных стволов на ее остаточную прочность / С.Р. Ильин, С.С. Ильина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 77-87.
3. Ильин, С.Р. Механика шахтного подъема: монография / С.Р. Ильин, С.С. Ильина, В.И. Самуся. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2014. – 247 с.
4. Влияние сверхнормативных отклонений направляющих проводников в шахтных стволах с жесткой армировкой на работоспособность шахтных подъемных установок / Перовский Ю.М. [и др.] // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – № 7-8. – С. 31-33.
5. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт: утв. Первым заместителем Министра угольной промышленности СССР 04.03.1983. – Донецк: НИИГМ им. М.М. Федорова, 1985. – 172 с.
6. Программа технического переоснащения стационарного оборудования угледобывающих предприятий Минэнергопрома на 2010-2015 годы // Министерство угольной промышленности Украины. – Киев, 2009. – 85 с.
7. Волошин, А.И. Консольно-демпфирующие расстрелы армировки вертикальных шахтных стволов / А.И. Волошин, А.А. Рубель, А.В. Рубель. – Геотехнічна механіка. – 2016. – № 127. – С. 89-98.
8. Василькевич, В.И. Определение экстремальных значений динамических нагрузок на армировку шахтных стволов / В.И. Василькевич, В.И. Дворников, С.Р. Ильин // Геотехнічна механіка. – 2016. – № 126. – С. 71-80.

---

**Информация об авторах**

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

*Дворник Александр Петрович* – кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Технология и оборудование разработки месторождений полезных ископаемых», филиал Белорусского национального технического университета (ул. Гуляева, 2, 223710, г. Солигорск, Беларусь), e-mail: [soligorsk@bntu.by](mailto:soligorsk@bntu.by).

**Information about the authors**

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

*Dvornik Aliaksandr Petrovich* – Ph. D. (Engineering), Lecturer of the Department of Technology and Equipment for the Development of Mineral Deposits, Branch of the Belarusian National Technical University (2, Gulyaeva Str., 223710, Soligorsk, Belarus), e-mail: [soligorsk@bntu.by](mailto:soligorsk@bntu.by).

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

УДК 625.144.5/.7

**Моисеенко В.Л., Жигар В.И., Письменная Н.В.***УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ  
ЗВЕНОСБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ**

**Аннотация.** Для построения высокоточных имитационных моделей различных систем необходимо руководствоваться определенной методикой. «Классический» подход к созданию имитационных моделей содержит лишь обобщенный порядок и содержание этапов создания моделей. Для построения имитационных моделей эксплуатируемых и проектируемых звеносборочных линий необходима универсальная методика, которая позволяет строить высокоточные имитационные модели данных систем, независимо от их конструктивных и технологических параметров.

**Ключевые слова:** звеносборочная линия, имитационная модель, универсальная методика, высокая точность.

**Moiseenko V.L., Zhigar V.I., Pismennaya N.V.***Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING SIMULATION MODELS  
OF LINK ASSEMBLY LINES**

**Abstract.** To build high-precision simulation models of various systems, it is necessary to follow a certain methodology. The “classical” approach to creating simulation models contains only a generalized order and content of the stages of creating models. To build simulation models of operated and designed link assembly lines, a universal technique is needed that allows to build high-precision simulation models of these systems, regardless of their design and technological parameters.

**Keywords:** assembly line, simulation model, universal technique, high accuracy.

**Введение.** Со своего зарождения в середине 1960-х годов до настоящего времени имитационное моделирование, как способ изучения сложных систем, получило значительное развитие, что было в значительной степени продиктовано стремительным развитием компьютерных технологий [1]. Однако при этом, основные этапы создания имитационных моделей (ИМ), следование которым позволяет решать стоящие перед исследователем задачи наилучшим образом с помощью имитационного моделирования, по своей сути остались неизменными [2-6].

**Результаты исследования.** Согласно [6] основные этапы имитационного моделирования следующие.

1. Определение системы – установление границ, ограничений и измерителей эффективности системы, подлежащей изучению.

2. Формулирование модели – переход от реальной системы к некоторой логической схеме (абстрагирование).

3. Подготовка данных – отбор данных, необходимых для построения модели, и представление их в соответствующей форме.

4. Трансляция модели – описание модели на языке, приемлемом для используемой ЭВМ.

5. Оценка адекватности – повышение до приемлемого уровня степени уверенности, с которой можно судить относительно корректности выводов о реальной системе, полученных на основании обращения к модели.



**Рисунок 1. – Этапы процесса имитации**

На основании данной общей методики разработана универсальная методика построения ИМ звеносборочных линий (ЗСЛ).

На рисунке 2 представлены этапы процесса создания ИМ эксплуатируемых автоматизированных ЗСЛ, предназначенных для сборки рельсошпальной решетки (РШР) на железобетонных шпалах, для определения зависимости выходных параметров от организационных, технологических факторов, технических характеристик их элементов, согласно разработанной методике.

На 1 этапе (рисунок 2) требуется подробно изучить сопроводительную документацию на ЗСЛ от производителя (технический паспорт, руководство по эксплуатации, конструкторские чертежи). Знание конструкторской документации, регламентирующей расположение станков и агрегатов ЗСЛ, и технологического процесса сборки РШР на ЗСЛ позволяет построить структуру будущей ИМ.

На 2 этапе – изучение перечисленной документации необходимо для формирования исходных данных при разработке ИМ. Сбор статистической информации по работе ЗСЛ необходимо выполнить за возможно больший временной период, лучше всего за весь период эксплуатации ЗСЛ. Бухгалтерская и экономическая документация необходимы для расчетов экономической эффективности, выполняемых на этапе 8.

На 3 этапе требуется провести натурные измерения продолжительности выполнения каждой технологической операции непосредственно во время работы ЗСЛ ввиду того, что фактические значения могут значительно отличаться от установленных нормами и/или паспортных данных. В дальнейшем, при задании исходных параметров объектов ИМ ЗСЛ необходимо использовать именно полученные в ходе натурных измерений данные.

Этапы 1-3 относятся к подготовительным и могут выполняться в любой последовательности.

6. Стратегическое планирование – планирование эксперимента, который должен дать необходимую информацию.

7. Тактическое планирование – определение способа проведения каждой серии испытаний, предусмотренных планом эксперимента.

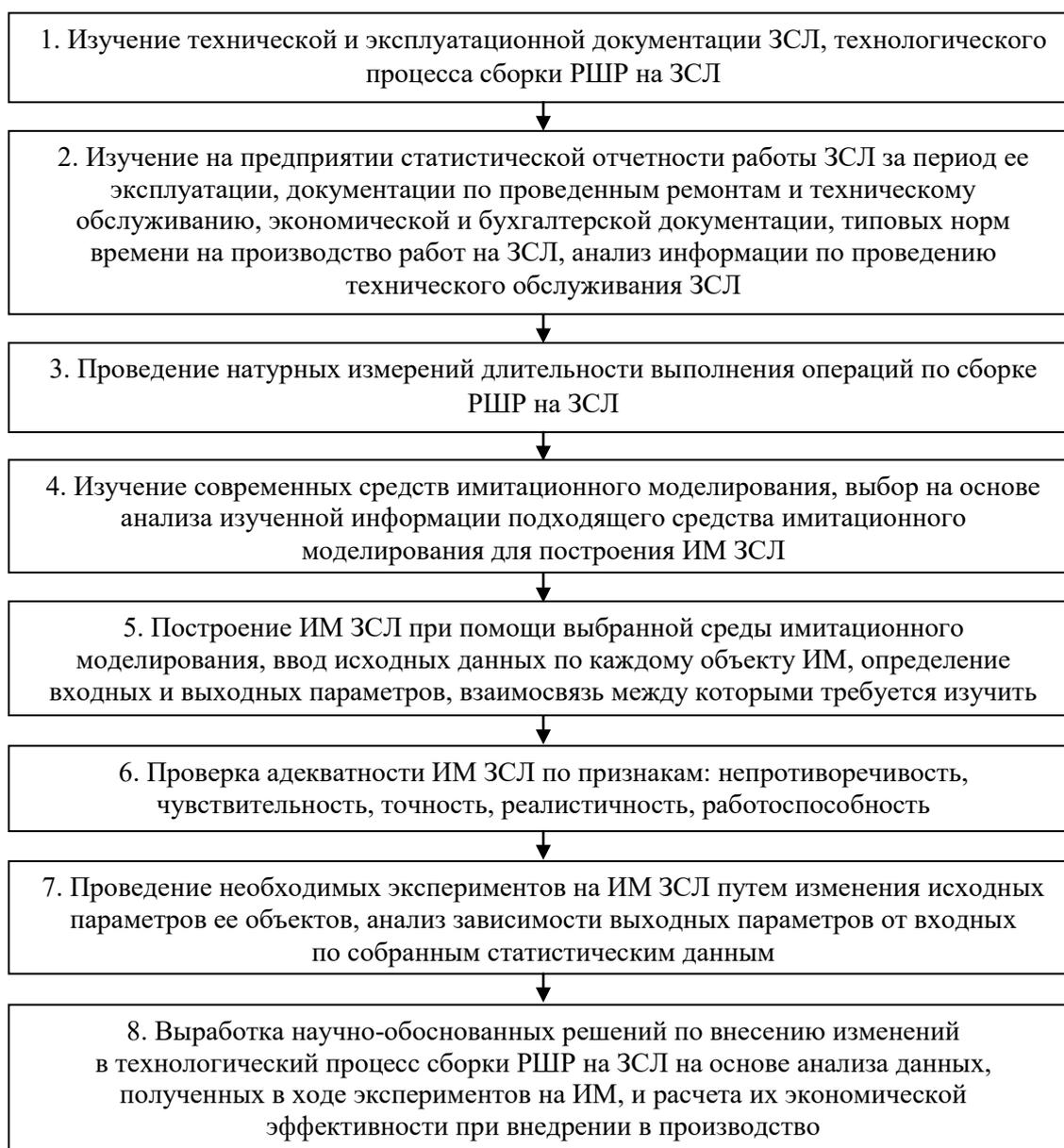
8. Экспериментирование – процесс осуществления имитации с целью получения желаемых данных и анализа чувствительности.

9. Интерпретация – построение выводов по данным, полученным путем имитации.

10. Реализация – практическое использование модели и (или) результатов моделирования.

11. Документирование – регистрация хода осуществления проекта и его результатов, а также документирование процесса создания и использования модели.

Этапы «классического» процесса имитации в их взаимосвязи показаны на блок-схеме (рисунок 1).



**Рисунок 2. – Этапы создания ИМ автоматизированных ЗСЛ**

На 4 этапе требуется подробно изучить современные средства имитационного моделирования, используемые для совершенствования и развития промышленных предприятий, с целью выбора подходящего средства для решения поставленных задач. В настоящее время на рынке информационных технологий существует порядка 150 программных продуктов аналитического типа, ориентированных на имитационное моделирование [7]. Диапазон и разнообразие данного программного обеспечения продолжает расти, отражая тенденцию устойчивого спроса на него. Основные современные средства имитационного моделирования представлены в таблице.

При выборе системы имитационного моделирования для решения поставленных задач необходимо отдавать предпочтение тем системам, в которых реализованы: возможность описания логики поведения объектов на встроенном языке; простота освоения среды моделирования; поддержка иерархического моделирования сложных систем; возможность интерактивной отладки и разработки интерфейса для пользователя моде-

ли; импорт и экспорт данных; обеспечение разработки сценариев моделирования; поддержка непрерывно-дискретного моделирования; связь среды имитационного моделирования с другим программным обеспечением; возможности анимации и динамической графики, обеспечивающих визуализацию модели и отображение ее параметров; различные статистические возможности; поддержка пользователя среды имитационного моделирования; оправданные требования к компьютерному оборудованию и программному обеспечению; наличие развитых стандартных библиотек; возможность формирования отчетов с выходными данными [8-12].

Таблица. – Основные современные средства имитационного моделирования

Пакет	Производитель	Типовые модули пакета	Области применения пакета
AnyLogic	XJ Technologies	Анализ системной динамики, анализ рисков, оптимизация, планирование, поддержка принятия решения, агентный подход	Стратегический менеджмент, производство, обслуживание, логистика, цепочки поставок, медицина, транспорт, IT управление, телекоммуникации, наука
Arena	Rockwell Software	Производство, цепочки поставок, бизнес-процессы, медицина, военно-промышленный комплекс (ВПК), складирование и логистика	Производство, цепочки поставок/логистика, управление бизнес-процессами, ВПК, медицина
AutoMod	Brooks Automation	Транспортные системы, складирование, линии расфасовки, производство	Автомобильная, аэрокосмическая отрасли, моделирование аэропортов, производство, складирование и сбыт
eM-Plant	Tecnomatix Technologies Inc.	Производство, транспортировка, разгрузочно-погрузочные операции, симуляция бизнес-процессов, логистика, продажи, календарное планирование, выработка ритма производства, верификация процессов, цепочки поставок	Дискретное производство (автомобильная отрасль, электроника, судостроение, станкостроение, сборочные линии и т.д.), логистика, сбыт, консалтинг, здравоохранение, банковский бизнес
Extend Industry	Imagine That, Inc.	Моделирование крупномасштабных систем с большими нагрузками. Включает внутреннюю реляционную базу данных и модуль для моделирования	Системы массового обслуживания, включая сбытовую логистику, call centers с большой нагрузкой, упаковочные линии и т.д.
ProModel	ProModel Solutions	Анализ отклонений, шесть сигм; проектирование и планирование портфеля; оценка мощностей, анализ затрат; моделирование циклических усовершенствований во времени; цепи поставок	Производство и логистика, фармацевтика
QUEST	Delmia	-	Производство (автомобилестроение, авиастроение, космонавтика, электроника, судостроение)
Witness	Lanner Group Ltd	Производство, оптимизация, планирование, календарное планирование, моделирование бизнес-процессов	Шесть сигм, call center, ВУЗы, моделирование бизнес-процессов, производство

На 5 этапе прорабатывается концептуальная структура ИМ ЗСЛ, отражающая ее реальную структуру на некотором уровне абстракции, определяются связи между ком-

понентами модели, описывается управляющая логика подсистем. Для создания гибкой ИМ необходимо провести декомпозицию моделируемой системы на структурные элементы, которым будут соответствовать объекты модели. Количество таких объектов должно быть необходимым и достаточным. При недостаточном количестве объектов среда моделирования получится недостаточно гибкой. Избыточное количество объектов усложнит процесс создания модели и повысит вероятность ошибок. При разработке концептуальной структуры ИМ необходимо руководствоваться документацией, изученной на этапе 1. Затем ИМ и ее анимационное представление (в случае необходимости) реализуются в среде моделирования.

На этапе 6 проводится проверка адекватности ИМ ЗСЛ по признакам: непротиворечивость, чувствительность, точность, реалистичность, работоспособность.

Поскольку модель ЗСЛ разрабатывается в целях проведения на ней экспериментов, а результаты этих экспериментов в дальнейшем будут использованы для принятия управленческих решений в реальных производственных условиях, разработанная ИМ и результаты моделирования должны заслуживать доверия.

Процесс проверки достоверности результатов моделирования, при котором происходит проверка правильности преобразования имитационной модели в компьютерную программу путем сверки полученных расчетных данных и полученных на практике, называется верификацией [13, 14].

Проверка на соответствие ИМ, основываясь на ее целевой направленности, называется валидацией [13]. В отличие от верификации, валидация используется не всегда. Потребность в ней возникает только при возникновении конкретных требований при использовании продукта [14].

Анализ литературных источников показал, что существует несколько рекомендаций относительно определения адекватности ИМ, при этом критерии оценки адекватности не являются однозначными [6, 13, 15-17]. В методике, разработанной в данном исследовании, объединены и конкретизированы все рекомендации определения адекватности ИМ, при этом из оценки исключается субъективный фактор. Согласно методике, модель признается адекватной, если одновременно выполняются все следующие условия.

1. Непротиворечивость – результаты моделирования не должны противоречить логике.

ИМ ЗСЛ необходимо строить в строгом соответствии с ее реальной конструкцией, технологическим процессом сборки РШР на ней, установленными нормами времени на выполнение технологических операций.

2. Чувствительность – выходные данные модели должны изменяться при внесении изменений в исходные параметры объектов модели.

При изменении исходных данных для объектов разработанной имитационной модели (время выполнения операций, работоспособность оборудования и т.д.) значение ее выходных параметров должно изменяться, а логика изменений сохраняться. Так, например, при увеличении времени выполнения операций по комплектации шпал элементами скрепления на участке сборки звена, производительность сборки РШР на ЗСЛ должна снижаться и наоборот.

3. Точность и реалистичность – выходные данные модели должны находиться в пределах допустимых значений и соответствовать фактическим данным.

При оценке погрешности моделирования известно, что любая ИМ неточна из-за наличия ошибок при аппроксимации реальных процессов и их реализации в ИМ. К ошибкам аппроксимации добавляются также ошибки, связанные с розыгрышем случайных значений некоторых параметров ИМ [18]. Также, существует ряд факторов производственного и непромышленного характера, прямо или косвенно влияющих

на выходные данные эксплуатируемой ЗСЛ, которые невозможно или нецелесообразно учитывать в ИМ. Например, плохие погодные условия, задержка в поставке материалов верхнего строения пути на производственную базу, внезапные отказы технических средств, недостаточное количество необходимых работников и т.д. Эти типы ошибок невозможно разделить, поэтому оценивается суммарная погрешность моделирования.

Поскольку моделируемая система – ЗСЛ, уже введенная в эксплуатацию, выходные данные ее работы доступны для анализа. Поэтому для проверки адекватности ИМ и оценки погрешности моделирования, необходимо проверить соответствие между статистическими данными, полученными в ходе имитации производственного процесса на ИМ, и аналогичными статистическими данными (собранными на подготовительных этапах 1-3) по результатам фактической работы ЗСЛ. Рациональнее всего оценивать погрешность моделирования, сравнивая фактическую производительность ЗСЛ с производительностью, просчитываемой ИМ за определенный временной период, поскольку данный параметр является определяющим в работе ЗСЛ, а также подлежит обязательному документированию в отчетных документах.

Анализ литературных источников показал, что процент соответствия ИМ реальной системе, при которой модель признается заслуживающей доверия, находится в пределах 5-20 %. При построении ИМ по разработанной методике можно достигнуть процента погрешности моделирования менее 5 %.

4. Работоспособность – модель должна давать полезную информацию об исследуемом объекте.

Выбранная для работы среда имитационного моделирования должна обеспечивать накопление различных статистических данных для возможности их последующего анализа.

Если построенная ИМ звеносборочной линии не отвечает всем описанным условиям, то для более точного отражения параметров реальной системы необходимо выполнить ее калибровку, вернувшись к первому этапу разработанной методики, проанализировать: что может быть причиной серьезного несоответствия ИМ реальной системе. На основании этого анализа внести в работу по построению ИМ необходимые уточнения и дополнения.

На этапе 7 осуществляется планирование и проведение компьютерных экспериментов – запуск на исполнение ИМ при различных значениях ее входных параметров и наблюдение за ее поведением с регистрацией значений выходных параметров ее элементов. Результаты моделирования фиксируются и представляются в наглядном виде, для чего используются различные виды графиков и таблицы. Далее результаты моделирования анализируются – устанавливается влияние входных параметров на выходные параметры, определяется: какие изменения технологического процесса сборки РШР на ЗСЛ приводят к наиболее благоприятным результатам.

Этапы 5-7 относятся к разработке ИМ и должны выполняться в полном объеме, согласно указанному в методике порядку.

Управленческие решения по оптимизации технологического процесса сборки РШР на ЗСЛ (этап 8) с целью улучшения ее выходных параметров формируются на основании анализа, выполненного на этапе 7. При этом данные решения должны быть подкреплены расчетами экономической эффективности их внедрения в технологический процесс, выполненными на основании данных, собранных на этапе 2.

Разработанная согласно предлагаемой методике ИМ ЗСЛ также будет соответствовать критериям, которым должна удовлетворять хорошая модель: будет простой и понятной пользователю, целенаправленной, надежной (в смысле гарантии от абсурдных ответов), удобной в управлении и обращении, полной с точки зрения возможно-

стей решения главных задач, адаптивной (позволяющей легко переходить к другим модификациям и обновлять данные), допускающей постепенные изменения в том смысле, что, будучи вначале простой, она может во взаимодействии с пользователем становится все более сложной [19].

Анализ конструкций современных ЗСЛ показывает, что технологический процесс сборки РШР на них является типовым, основанным на технологическом процессе сборки РШР вручную с применением ручного путевого инструмента и средств малой механизации. Отличия заключаются только в применяемых механизмах самой линии (зависят от типа собираемого скрепления, например, СБ-3, КБ, АРС), обслуживающих ее грузоподъемных кранов (мостовые и козловые краны могут быть разных моделей на разных предприятиях, однако, их участие в технологическом процессе сборки РШР принципиально не отличается), количестве рабочего персонала, занятого на ЗСЛ. Так, например, уборка деревянных прокладок с рядов шпал осуществляется работниками при сборке РШР вручную самостоятельно, при сборке на ЗСЛ – специальным механизмом, на этапе окончательной сборки звена РШР зажатие пружинных клемм (скрепление СБ-3) выполняется специальным станком, клеммных и закладных болтов (скрепление КБ) – гайковертами и т.д. Данные отличия задаются при помощи исходных данных на этапе построения ИМ. Ввиду этого, предлагаемая методика изучения влияния внешних факторов на выходные параметры работы ЗСЛ для сборки РШР на железобетонных шпалах с применением средств имитационного моделирования является универсальной и может быть использована при изучении ЗСЛ данного типа различных конструкций и модификаций.

#### **Заключение.**

1. Основные этапы создания имитационных моделей, следование которым позволяет решать стоящие перед исследователем задачи наилучшим образом с помощью имитационного моделирования, были сформулированы в 1960-х годах и с тех пор остались неизменными по своей сути.

2. На основании уже сформулированной методики была разработана специальная методика построения имитационных моделей эксплуатируемых звеносборочных линий, предназначенных для сборки РШР на железобетонных шпалах. Разработанная методика является универсальной и может быть использована при изучении звеносборочных линий различных конструкций и модификаций. При этом достигается высокая точность соответствия имитационной модели эксплуатируемой звеносборочной линии (погрешность моделирования до 5 %).

3. По описанной методике построена имитационная модель полуавтоматической звеносборочной линии КБ03, спроектированной ОАО «Барановичский завод автоматических линий» на основе звеносборочной линии ПЗЛ, введенной в эксплуатацию в 2012 году в Республиканском унитарном предприятии «Ремпуть Белорусской железной дороги» структурное подразделение путевого машинного станция Барановичи. Построение имитационной модели и результаты ее проверки описаны в [20].

#### **Список использованных источников**

1. Коных, В.Л. Развитие средств имитационного моделирования / В.Л. Коных, Я.Б. Игнатъев, В.В. Зиновьев // Имитационное моделирование. Теория и практика: тез. докл. всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 19-21 окт. – СПб., 2005. – Т. 1. – С. 122-126.

2. Боев, В.Д. Компьютерное моделирование: пособие для курсового и дипломного проектирования / В.Д. Боев, Д.И. Кирик, Р.П. Сыпченко. – СПб.: ВАС, 2011. – 348 с.
3. Коровин, А.М. Моделирование систем: учеб.-метод. пособие / А.М. Коровин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2010. – 47 с.
4. Law, A.M. How to build valid and credible simulation models / A.M. Law // Proc. of the Winter Simulation Conf., Miami (USA), 7-10 Dec. – 2008. – P. 39-47.
5. Конюх, В.Л. Методы имитационного моделирования дискретных систем: обзор программных продуктов / В.Л. Конюх, Я.Б. Игнатъев, В.В. Зиновьев. – Рос. акад. наук, Сиб. отд.-ние, Кемер. науч. центр. – Кемерово: КемНЦ, 2003 // Портал: Российская государственная библиотека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003131133>. – Дата доступа: 26.01.2021.
6. Шенон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шенон. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
7. Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде Tecnomatix Plant Simulation: лабораторный практикум / И.Г. Абрамова [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2014. – 80 с.
8. Журавлев, С.С. Краткий обзор методов и средств имитационного моделирования производственных систем / С.С. Журавлев // Проблемы информатики. – 2009. – № 3. – С. 47-53.
9. Официальный сайт Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plm.automation.siemens.com>. – Дата доступа: 26.01.2021.
10. Сырецкий, Г.А. Plant Simulation как современная основа обучения имитационному моделированию. Практическое применение имитационного и комплексного моделирования и средств автоматизации моделирования / Г.А. Сырецкий // Имитационное моделирование. Теория и практика: тез. докл. всерос. науч.-практ. конф., Новосибирск, 19-21 дек. – Новосибирск, 2009. – Т. 1. – С. 120-124.
11. Леонова, Н.Л. Имитационное моделирование: конспект лекций / Н.Л. Леонова. – СПб.: ГТУРП, 2015. – 94 с.
12. Лычкина, Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах и системах поддержки принятия решений / Н.Н. Лычкина // Имитационное моделирование. Теория и практика: тез. докл. всерос. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 19-21 окт. – СПб., 2005. – Т. 1. – С. 25-31.
13. Яцкив, И.В. Проблема валидации имитационной модели и ее возможные решения / И.В. Яцкив // Теория имитационного моделирования: тез. докл. всерос. науч.-практ. конф., Рига, 17-19 окт. – Рига, 2007. – Т. 1. – С. 211-217.
14. Кельтон, В. Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – 3-е изд. – СПб.: Питер, 2004. – 847 с.
15. Fishman, G.S. The Analysis of Simulation-Generated Time Series / G.S. Fishman, P.J. Kiviat // Management Science. – 1967. – V. 13, № 7.
16. Turing, A.M. Computing Machinery and Intelligence. / A.M. Turing // Mind, New Series. – 1959. – V. 59.
17. Кузина, С.М. Разработка инструментов планирования процессов подготовки производства на основе имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.22 / С.М. Кузина. – М., 2019. – 167 л.
18. Якимов, А.И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий: монография / А.И. Якимов. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.

19. Little J.D.C. Models and Concert of a Decision Calculus / J.D.C. Little // Management Science. – 1970. – V. 16. – P. 466-485.

20. Жигар, В.И. Повышение производительности звеносборочной линии КБ03 / В.И. Жигар // Известия Транссиба. – 2020. – № 2. – С. 60-70.

---

#### Информация об авторах

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

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

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

#### Information about the authors

*Moiseenko Vladimir Leonidovich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, “Transport and technological machines and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: dm@bsut.by.

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

*Pismennaya Natalia Vladimirovna* – Master of technical sciences, Post-graduate Student, “Transport and technological machines and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: dm@bsut.by.

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

УДК 551.5:629.1.04

**Кудина Е.Ф.<sup>1,2</sup>, Приходько И.В.<sup>1</sup>, Карпенко В.В.<sup>3</sup>, Курицын П.А.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь<sup>2</sup>Государственное научное учреждение «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», г. Гомель, Беларусь<sup>3</sup>ГП «Завод «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», г. Харьков, Украина

## ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

**Аннотация.** Рассмотрены аспекты эксплуатации электрооборудования и устройств управления в условиях воздействия предельных значений ряда климатических параметров, а также работоспособность оборудования с изменением высоты. Проведен анализ результатов воздействия климатических факторов на физико-механические свойства элементной базы, сроки эксплуатации изоляционных материалов, а также безопасность и качество работы электрооборудования. Оценена значимость проведения сертификационных испытаний объектов транспортной отрасли для обеспечения их работоспособности, надежности и безопасности.

**Ключевые слова:** температура, давление, влажность воздуха, изоляция, термостойкость, температурное старение.

**Kudina E.F.<sup>1,2</sup>, Prihodzko I.V.<sup>1</sup>, Karpenko V.V.<sup>3</sup>, Kuritsyn P.A.<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus<sup>2</sup>V.A. Belyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus<sup>3</sup>SE Plant Electrotiyazhmash, Kharkov, Ukraine

## INFLUENCE OF CLIMATIC FACTORS ON PERFORMANCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT

**Abstract.** The aspects of operation of electrical equipment and control devices under the influence of limit values of a number of climatic parameters, as well as the performance of equipment with a change in altitude, are considered. The results of the impact of climatic factors on the physical and mechanical properties of the element base, the service life of insulation materials, as well as the safety and quality of electrical equipment are analyzed. The importance of carrying out certification tests of transport industry facilities to ensure their operability, reliability and safety is evaluated.

**Keyword:** temperature, pressure, humidity, insulation, heat resistance, temperature aging.

**Введение.** В настоящее время не существует ни одной отрасли народного хозяйства, где можно обойтись без применения техники. Оборудование позволяет автоматизировать процессы, повышать объемы производства, обеспечивать технологическим процессам более высокую энергоэффективность и экологическую безопасность. Техника позволяет интенсифицировать добычу, транспортировку и переработку сырья. Это стало возможно с введением в эксплуатацию техники на основе микропроцессорной (МП) и полупроводниковой (ПП) элементной базы (ЭБ) способной эффективно управлять тяговым оборудованием. Сегодня никого не удивить машинами и механизмами способными работать самостоятельно без участия человека. Это особенно важно во вредных или опасных условиях труда, где работа связана с риском для жизни или вредна для здоровья. К подобным условиям можно отнести работу при низких или высоких

температурах, а также в условиях их циклического изменения. Весь земной шар разделен на семь климатических зон, климат которых определяется как очень холодный, холодный, умеренный, тропический влажный, тропический сухой, умеренно холодный морской и тропический морской. Например, к территориям с холодным климатом можно отнести области, где средняя температура воздуха из ежегодных абсолютных минимумов опускается до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а к территориям с очень холодным климатом относятся районы, где средняя минимальная температура ниже  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . А для некоторых областей свойственны частые колебания относительно  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что приводит к появлению тумана, образованию инея или обледенения [1, 2]. Такой климат предполагает работу в сложных условиях, так как при достижении критических значений климатических параметров снижается стабильность функционирования, и возникают отказы в работе оборудования, что в совокупности может привести к выходу его из строя.

Влияние климатических параметров можно считать наиболее распространенными в части дестабилизации работы оборудования. Современное электрооборудование в основном предназначено для эксплуатации в нормальных климатических условиях: при температуре  $+25\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительной влажности воздуха 45-80 %, атмосферном давлении 83-106 кПа (от 630 до 800 мм рт. ст.), отсутствии активных веществ в окружающей атмосфере [1]. Отклонение условий эксплуатации от нормальных ухудшает работу не только ЭБ, но всего электрооборудования (ЭО) в целом, в том числе наиболее уязвимого тягового ЭО, расположенного под локомотивом, трамваем и другими транспортными средствами. Это обусловлено изменением физико-химических свойств материалов, из которых изготовлены элементы систем. Повышение или понижение температуры может в значительной мере менять механические свойства объектов, что приводит к появлению деформированного состояния, изменению твердости, прочности и упругости материалов, а также электромагнитных свойств. В результате совокупность вышеперечисленных факторов может привести к недопустимым искажениям сигналов или разрушению отдельных элементов, что влечет за собой остановку технологического оборудования и технологического процесса или даже, если это связано с движением, создание аварийной ситуации, связанной с риском для жизни.

**Влияние температуры на деформационные характеристики.** При изменении температуры материалы подвергаются в той или иной мере деформации. В основном, ее величина зависит от физико-химических свойств материала и, прежде всего, от температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР). Геометрические размеры однородного тела в зависимости от температуры определяются соотношением (1):

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (1)$$

где  $l$  и  $l_0$  – длина тела в нагретом (охлажденном) состоянии при температуре  $t$  и при нормальных условиях  $t_0$ , соответственно;

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения.

Таким образом, изменение геометрических размеров тел  $\Delta l$ , вследствие нагревания или охлаждения окружающей среды можно вычислить по следующей формуле:

$$\Delta l = \alpha l_0 \cdot \Delta t, \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – изменение температуры окружающей среды [3].

Анализ формулы (2) позволяет сделать вывод, что деформация тела одинаково зависит как от ТКЛР  $\alpha$ , так и от изменения температуры  $\Delta t$ . В таком случае очень важна однородность материала изделия, поскольку в объеме однородного изделия температура изменяется на одинаковую величину, и значительных внутренних напряжений

не возникает. Если конструкция состоит из нескольких блоков из различных веществ, то при изменении температуры их размеры могут измениться в разной степени и привести к возникновению разрушительной деформации.

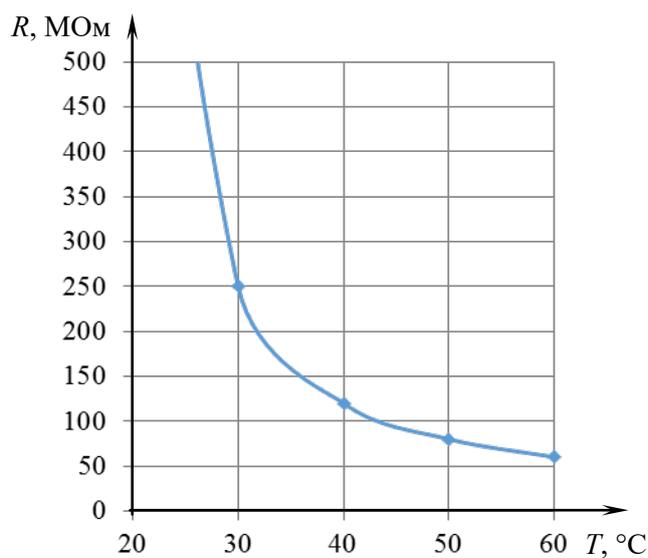
У большинства материалов, используемых в ПП устройствах, ТКЛР варьируется в диапазоне  $(1-300) \cdot 10^{-6}$  1/К. У металлов ТКЛР соответствует диапазону  $(1-40) \cdot 10^{-6}$  1/К, а у неорганических диэлектриков (керамика, стекло, кварц, слюда и др.), как правило, ТКЛР не превышает  $10 \cdot 10^{-6}$  1/К. Наибольшее значение ТКЛР до  $300 \cdot 10^{-6}$  1/К имеют различные органические диэлектрики. Различие ТКЛР, например, у металлов и пластмасс, приводит к образованию зазоров между этими материалами, которые являются путями для проникновения влаги. При низкой температуре адсорбированная на поверхности влага замерзает и, расширяясь, вызывает дальнейшее увеличение трещин и зазоров. При действии тепла и холода на припой, соединяющий одну деталь с другой, в нем могут возникнуть усилия, нарушающие целостность цепи. В результате может нарушиться электрический контакт радиодетали (РД) или радиокомпонента (РК) со схемой [3]. А при наличии у оборудования движущихся частей значительная разница ТКЛР или неравномерный нагрев могут привести к заклиниванию или ускоренному износу деталей.

Таким образом, если не учесть существенную разницу ТКЛР используемых совместно материалов, то изменение температуры может вызвать деформацию всего объекта и привести к разрушению и прекращению его дальнейшего функционирования.

**Влияние температуры и влажности на свойства материалов.** Как уже отмечалось, изменение температуры значительно влияет на свойства материалов. С повышением температуры происходит возрастание сопротивления некоторых металлов, а также уменьшается модуль упругости и предел прочности. Понижение температуры ведет к изменению индуктивности высокочастотных катушек и дросселей, а также к снижению пластичности и появлению хрупкости металлов. А главное, температура значительно влияет на электрические характеристики диэлектрических материалов. Рост температуры приводит к резкому падению сопротивления изоляции, наблюдается рост диэлектрических потерь, снижается величина диэлектрической проницаемости, а отдельные диэлектрические материалы теряют прочностные характеристики.

Электрическая прочность большинства диэлектриков (полиэтилена, эпоксидной смолы и т.д.) при действии тепла вначале увеличивается, а механическая прочность уменьшается вследствие удаления влаги. Затем наблюдается значительное снижение электрической прочности, и конечным результатом является механическое разрушение диэлектрика. Изоляционные материалы под действием циклического воздействия тепла и холода подвергается интенсивному старению, сопровождающемуся изменением электрических характеристик и физико-химических свойств. Больше всего подвержены старению органические изоляционные материалы. Длительное воздействие высокой температуры уменьшает механическую прочность органических материалов, в результате чего они становятся более хрупкими и, в конечном счете, могут быть разрушены под действием небольшого удара или вибрации [4]. Термостарение элементов считается одним из факторов увеличивающим процент отказов оборудования, так как значительно уменьшается срок их службы [5].

Изоляционные покрытия соединительных проводов выполняются из диэлектрических материалов (полимеров), сопротивление изоляции которых так же, как и у РД в значительной степени зависит от климатических параметров: температуры и влажности воздуха. Высокая температура эксплуатации значительно снижает сопротивление изоляции покрытий (рисунок 1).



**Рисунок 1.** – Зависимость сопротивления изоляции  $R$  кабеля из полиэтилена от температуры  $T$

Проверка электрической прочности и величины сопротивления изоляции материалов является одним из этапов анализа, определяющих возможность дальнейшей эксплуатации не только диэлектрических материалов, но и оборудования в целом. Особенно это важно когда речь идет о высоком напряжении. На железнодорожном подвижном составе ряд оборудования (высоковольтные межвагонные соединения, главные выключатели, ограничители перенапряжения и т.д.) эксплуатируется под напряжением до 30 кВ, и снижение сопротивления изоляции, обусловленное ростом температуры, и, как следствие, электрической прочности, может стать причиной пробоя изоляции или пере-

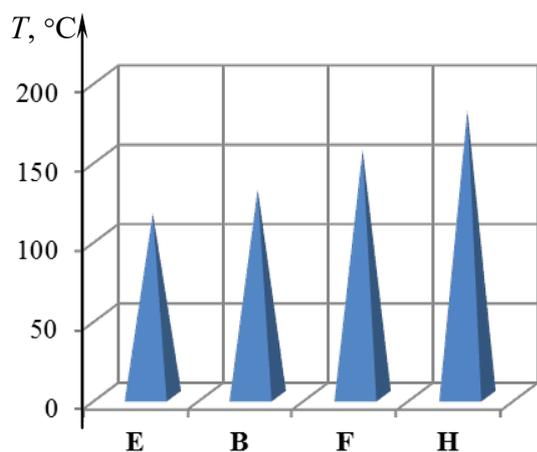
крытия по поверхности, что может привести к непоправимым последствиям.

Негативному влиянию температурного воздействия могут подвергаться и интегральные схемы, не смотря на их более высокую надежность в отличие от РД и РК. Но и они не застрахованы от возрастания сопротивления контактов или адсорбции воды, способствующих снижению качества их работы [6]. Среди интегральных схем можно выделить схемы в керамических корпусах, как наиболее устойчивых к такому воздействию. Однако, построить все устройство только на таких элементах невозможно, и в его схеме всегда найдутся ПП элементы или РД более подверженные климатическому воздействию, что снижает надежность всего устройства.

Негативное влияние климатических факторов может увеличиться, если к воздействию температуры добавится высокая влажность воздуха. В реальных условиях данные факторы часто являются сопутствующими. Под действием влажности воздуха интенсифицируются коррозионные процессы, снижаются диэлектрические свойства изоляционных материалов, а также в результате конденсации влаги на поверхности схемы может произойти короткое замыкание. Но даже при нормальных климатических условиях все предметы имеют на своей поверхности тончайшую водную пленку в несколько нанометров. Вследствие естественной ионизации и взаимодействия влаги с окружающей средой (растворению в ней солей, кислот и газов) такая пленка на поверхности изоляционных материалов значительно уменьшает их поверхностное сопротивление, а при проникновении образовавшихся растворов в объем материала снижает величину объемного сопротивления. В основном это касается изоляции, выполненной из волокнистых материалов (листовые бумага и картон коротковолокнистого строения, электроизоляционные текстильные материалы из растительных волокон и т.д.). Попадание влаги снижает диэлектрические характеристики изоляционного материала и требует его сушки. Влияние климатических параметров необходимо учитывать при проектировании не только элементов контроля и объектов управления, но и тягового оборудования и, в частности, электрических машин (ЭМ). Помимо этого, важной задачей является проведение анализа воздействия данных факторов в процессе приемочных и сертификационных испытаний.

**Влияние климатических параметров на работу ЭМ.** Некоторое оборудование (электродвигатели, генераторы и т.д.) при работе способно выделять теплоту в окружающую среду и тем самым менять климатические параметры. Это касается, прежде всего, оборудования, работающего в замкнутом пространстве. Нагрев электрической машины в целом и отдельных ее частей, например, обмотки и стали статора, ротора, подшипников, происходит за счет выделения тепла в этих и других частях [7]. Определить расчетом температуру нагрева отдельных частей электрической машины достаточно сложный процесс. Температура нагрева ЭМ может зависеть от разных факторов [8]. Величина установившейся температуры двигателя зависит от нагрузки на его валу. Приложение значительной нагрузки приводит к выделению большого количества теплоты в единицу времени. Допустимый нагрев ЭМ зависит от класса изоляции обмоток, коллектора, контактных колец и т.д.

Одним из основных свойств изоляции обмоток ЭМ является нагревостойкость материала изоляции. В соответствии с ГОСТ 8865 это способность электроизоляционных материалов, пропитываемых составов и изоляции проводов без повреждения и без существенного ухудшения практически важных свойств длительно выдерживать воздействие повышенной температуры [8]. Повышение температуры обмоток ЭМ выше допустимых значений приводит к сокращению срока службы изоляции. Таким образом, нагревостойкость изоляции – один из основных параметров, который определяет



**Рисунок 2.** – Предельные допустимые превышения температуры обмоток электрических машин (при температуре окружающей среды от 10 °С до 40 °С)

надежность работы и срок эксплуатации ЭМ. Самыми распространенными классами изоляции являются E, B, F и H. Ввиду низких температур эксплуатации класс E находит ограниченное применение в машинах малой мощности. Наибольшее распространение получила изоляция классов B и F, а в специализированных ЭМ, работающих в тяжелонагруженных условиях, используется изоляция класса H (рисунок 2) [9]. Вместе с тем, большим резервом повышения технических характеристик, в том числе ресурсных характеристик тяговых ЭМ, является переход на класс изоляции 200 °С и 220 °С. Такая конструкция изоляции находит все более широкое применение в тяговых ЭМ иностранных изготовителей, в том числе «Alstom transport»

(Франция), «General electric» (США), «TraktionssystemeAustriaGmbH» (Австрия) и др.

В результате исследований, проведенных в испытательном центре тягового электрооборудования ГП завод «Электротяжмаш» (ИЦ ТЭО), подтверждено, что образцы тяговых ЭМ с классом нагревостойкости 220 °С имеют существенно более высокую нагревостойкость изоляции по сравнению с образцами тяговых ЭМ с классом нагревостойкости H, а также не уступают в стойкости к низким температурам и демонстрируют способность работать в условиях воздействия повышенной влажности больший срок, чем большинство образцов с классом нагревостойкости H [10].

Изоляционные материалы при длительном воздействии повышенных температур подвержены тепловому старению, в результате чего в них происходят физико-химические изменения (рисунок 3). Длительное воздействие повышенных температур и кислорода воздуха, могут привести к термоусадке изоляции и, как следствие, образова-

нию трещин. В результате термоокислительной деструкции в изоляционном материале происходит сшивка молекул полимеров, вследствие чего увеличиваются жесткость и хрупкость (рисунок 3). А если учесть, что ЭМ при работе являются источниками вибрации, то это может интенсифицировать процесс ее выхода из строя.



**Рисунок 3. – Обмотка электродвигателя после длительного воздействия высоких температур**

Нередко возможен и обратный процесс – температурная деполимеризация, вследствие чего материал может размягчаться и выделять летучие продукты, способные разрушать контактирующие с ним материалы. Увеличение температуры

изоляции свыше допустимого уровня на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  сокращает срок ее эксплуатации в два раза. В основе данного явления лежит общий закон зависимости скорости химических реакций от температуры, описываемый уравнением Вант-Гоффа и Аррениуса [11]. Кроме температуры значительное влияние на интенсивность старения материала оказывают изменение давления воздуха, присутствие озона, являющегося более сильным окислителем, чем кислород, и других химических реагентов, способных интенсифицировать этот процесс. Давление воздушной среды и диапазон его изменения зависит от высоты места над уровнем моря, где эксплуатируется ЭМ. Поэтому, во избежание продолжительного и существенного перегрева и, как следствие, ухудшения состояния и срока эксплуатации ЭМ, эффективно используются системы охлаждения.

Классификация систем охлаждения ЭМ предусмотрена ГОСТ 20459. Различают естественное и искусственное охлаждение. Машины с естественным охлаждением не имеют специальных вентиляторов. Данный способ характерен для машин малой мощности и открытого типа. Машины с искусственным охлаждением снабжены специальными устройствами – вентиляторами, создающими давление охлаждающего газа, который, соприкасаясь с нагретыми частями машины, отбирает у нее теплоту, т.е. охлаждает их [12].

Совокупность воздействующих на элементы электрооборудования климатических факторов и их характеристики определяются климатической зоной, в которой они эксплуатируются. Значительный интерес вызывает эксплуатация ЭМ в условиях, отличающихся от нормальных. Допустимая мощность ЭМ, согласно ГОСТ 183, определяется по допустимой температуре статорной обмотки при температуре окружающей среды  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и работе на высоте не более 1000 м над уровнем моря. Реальная температура окружающей среды и высота над уровнем моря значительно влияют на величину отдаваемой мощности ЭМ, и если этого не учитывать, они могут работать длительно при температуре окружающей среды, превышающей максимальную рабочую. Во избежание недопустимого превышения температуры обмоток отдаваемая мощность должна быть снижена (рисунок 4) [13].

С ростом высоты эксплуатации ЭМ больше 1000 м над уровнем моря также необходимо снижать нагрузку на валу (рисунок 5) [14]. Это обусловлено изменением ряда эксплуатационных параметров. Помимо того, что изменяется температура окружающей среды, происходит снижение атмосферного давления и, как следствие, уменьшается

плотность воздуха. Таким образом, изменяются свойства охлаждающей среды (хладагента), и ЭМ, работая в тех же режимах, что и на высотах до 1000 м, будет подвергаться значительному перегреву, следствием которого станет сокращение срока ее эксплуатации.

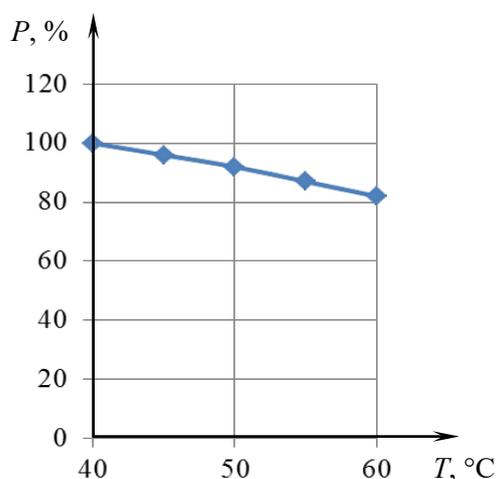


Рисунок 4. – Зависимость отдаваемой мощности  $P$  электрических машин от температуры  $T$

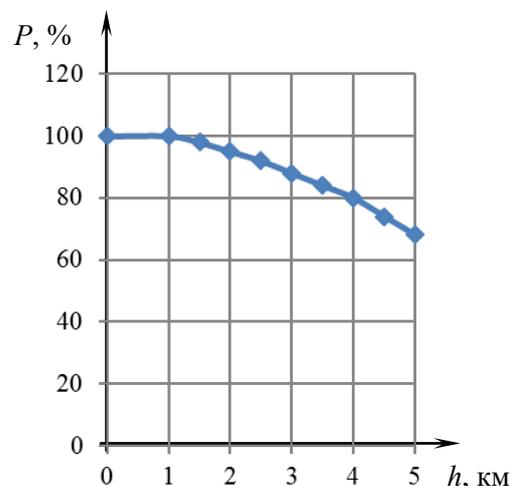


Рисунок 5. – Зависимость отдаваемой мощности  $P$  электрических машин от высоты  $h$

Одним из возможных способов снижения нагрева ЭМ, помимо уменьшения мощности на валу, является повышение расхода хладагента. Масса  $m$  проходящего при охлаждении хладагента пропорциональна его плотности и определяется:

$$m = \rho \cdot V, \quad (3)$$

где  $\rho$  и  $V$  – плотность и объем хладагента соответственно.

Следовательно, используя выражение (3) и рассматривая его во временном диапазоне, можно определить необходимый расход хладагента (воздуха)  $v_h$ , исходя из плотности среды на различных высотах над уровнем моря:

$$v_h = (\rho_0 \cdot v_0) / \rho_h, \quad (4)$$

где  $v_0$  – расход воздуха на высоте до 1000 м;

$\rho_0$  – плотность воздуха на высоте до 1000 м;

$\rho_h$  – плотность воздуха на высоте свыше 1000 м.

Необходимый расход охлаждающего агента определяется величиной потерь  $\Sigma P$ , которые отводятся из машины охлаждающей средой с теплоемкостью  $c$ :

$$v_h = \Sigma P / (c \cdot \Delta t). \quad (5)$$

Перегрев хладагента  $\Delta t$  определяется разностью температур выходного  $t$  и входного  $t_0$  потоков.

Сумму потерь, выделяемых в машине, можно определить из соотношения:

$$\Sigma P = P_n \cdot (1 - \eta) / \eta, \quad (6)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность;

$\eta$  – КПД.

Подставив выражение (4) и (6) в (5), можно рассчитать температуру потока хладагента на выходе из ЭМ:

$$t = \frac{P_n \cdot (1 - \eta) \cdot \rho_h}{v_0 \cdot c \cdot \eta \cdot \rho_0} + t_0. \quad (7)$$

Определив необходимую скорость потока, зная параметры окружающей среды, можно предотвратить возможность перегрева ЭМ и продлить срок ее эксплуатации.

Таким образом, с ростом высоты из-за уменьшения плотности воздуха увеличиваются фактические превышения температуры всех видов изделий, выделяющих при работе тепло и полностью или частично охлаждаемых путем свободной или принудительной конвекции воздуха. При использовании таких изделий на высотах более 1000 м допустимое превышение температуры должно быть понижено на величину, соответствующую поправке на высоту. В стандартах или технических условиях на такие изделия должны быть указаны поправки на величину уменьшения номинальной нагрузки изделия (если это возможно) или на величину уменьшения предельно допустимых превышений температуры, превышающей нормальную. Согласно ГОСТ 15150 для изделий, предназначенных для работы на высоте от 1000 м до 4300 м, верхние значения температуры могут быть вычислены уменьшением максимального значения на 0,6 °С на каждые 100 м для высот более 1000 м [1].

**Испытания на стойкость к климатическим воздействиям.** Основной целью проведения испытаний на климатические воздействия является контроль работоспособности оборудования в условиях действия верхних и нижних значений температур, в условиях воздействия изменения температуры, а также влажности воздуха при эксплуатации, транспортировке и хранении. Программу проведения климатических испытаний и методику их проведения составляют и подбирают таким образом, чтобы испытания проводились наиболее близко к тем условиям, в которых осуществляется эксплуатация оборудования. Важно, чтобы испытания не только соответствовали по величине значениям температур и диапазонам влажности, но и продолжительности их воздействия, достаточной скорости изменения и необходимого количества циклов чередования климатических параметров. Допускается проведение испытаний как при воздействии параметров в отдельности, так и в совокупности, в зависимости от возможности испытательного оборудования или методики испытаний. Помимо этого, в качестве дополнения к испытаниям в сложных климатических условиях могут быть добавлены и специальные испытания (например, воздействие соляного тумана, динамического воздействия пыли и воды и др.). Нормативные значения показателей и продолжительность проведения испытаний определяются нормативной и технической документацией.

Важным условием качества проведения испытаний является определение очередности их проведения. Стойкость к климатическим воздействиям следует проводить после осуществления внешнего механического воздействия, так как после действия механических факторов могут появиться микротрещины, развитость которых может усугубиться в процессе климатических испытаний [15, 16]. А оценку сопротивления и электрической прочности изоляции следует проводить до и после климатического воздействия, чтобы определить устойчивость материала к таким негативным факторам.

#### **Вывод.**

Таким образом, учет влияния климатических факторов на стадии разработки и проектирования оборудования и техники является важным условием, определяющим длительность и безотказность работы. А перед вводом в эксплуатацию необходимо проведение приемочных и периодических испытаний с целью подтверждения качества готовой продукции. Особенно это важно для техники, которая эксплуатируется в слож-

ных климатических условиях. Неправильная оценка условий эксплуатации и не в полной мере осуществленный учет последствий влияния климатических параметров может привести к значительному экономическому ущербу.

#### Список использованных источников

1. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: ГОСТ 15150-69. – Введ. 01.01.71. – М.: Межгосударственный стандарт: Стандартинформ, 2006. – 60 с.
2. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам: ГОСТ 17516.1-90. – Введ. 01.01.91. – Минск: Государственный стандарт Республики Беларусь: Госстандарт, 1990. – 76 с.
3. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 432 с.
4. Митрейкин, Н.А. Надежность и испытания радиодеталей и радиокомпонентов / Н.А. Митрейкин, А.И. Озерский. – М.: Радио и связь, 1981. – 272 с.
5. Электрорадиоэлементы: в 2 частях / СПб.: СПб. НИУ ИТМО, 2012-2015. – Часть 1: Резисторы / И.Б. Бондаренко. – 2012. – 108 с.
6. Электронные приборы: лаб. практикум: в 2 частях / Минск: БГУИР, 2012-2014. – Часть 1: Активные компоненты полупроводниковой электроники / А.Я. Бельский [и др.]. – 2012. – 75 с.
7. Борисенко, А.И. Охлаждение промышленных электрических машин / А.И. Борисенко, О.Н. Костилов, А.И. Яковлев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
8. Автоматическая защита электрооборудования: в 2 частях / В.В. Гурин. – Минск: БГАТУ, 2010-2011. – Часть 2: Защита асинхронных трехфазных электродвигателей: учебно-методическое пособие / В.В. Гурин. – 2011. – 452 с.
9. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: ГОСТ 2582-2013. – Введ. 01.04.20. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартинформ, 2014. – 52 с.
10. Карпенко, В.В. Исследования систем изоляции класса нагревостойкости 220 °С тяговых электрических машин на устойчивость к воздействию внешних климатических факторов / В.В. Карпенко, Д.Ю. Василенко, С.И. Яцко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5 (313). – С. 152-159.
11. Основы физической химии. Теория и задачи: учеб. пособие для вузов / В.В. Еремин [и др.]. – М.: Издательство «Экзамен», 2005. – 480 с.
12. Брандина, Е.П. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах: учеб. пособие / Е.П. Брандина, О.В. Шелудько. – Л.: СЗПИ, 1991. – 92 с.
13. Технический каталог электродвигателей Владимирского электромоторного завода ВЭМЗ (РУСЭЛПРОМ). – Владимир: ОАО «Владимирский электромоторный завод». – 2007. – 108 с.
14. Юлдашев, А.А. Влияние высоты над уровнем моря и температуры окружающей среды на отдаваемую мощность асинхронного двигателя / А.А. Юлдашев, З.Ш. Юлдашев // Вестник студенческого научного общества. – 2014. – № 3. – С. 105-106.
15. Приходько, И.В. Влияние вибрации на надежность и безопасность электрических машин / И.В. Приходько // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 4. – С. 74-80.

16. Качановский, О.И. Условия эксплуатации электроизоляционных материалов как фактор изменения их свойств / О.И. Качановский, А.Д. Соболев // Вестник морского государственного университета. – 2013. – № 58. – С. 18-24.

#### Информация об авторах

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

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

*Карпенко Владимир Владиславович* – кандидат технических наук, член Крымской Академии Наук, заместитель главного конструктора, руководитель испытательного центра тягового электрооборудования, ГП «Завод «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ» (пр. Московский, 299, 61089, г. Харьков, Украина), e-mail: icteo@spetm.com.ua.

*Курицын Павел Андреевич* – магистр технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Электрические и электронные системы» ИЦ ЖТ БелГУТа, УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: pavelkuritsyn97@gmail.com.

#### Information about the authors

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

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

*Karpenko Vladimir Vladislavovich* – Ph. D. (Engineering), Member of the Crimean Academy of Sciences, Deputy chief designer, Head of the test center of traction electrical equipment, SE Plant Electrotiyazhmash (299, Moskovsky Ave., 61089, Kharkov, Ukraine), e-mail: icteo@spetm.com.ua.

*Kuritsyn Pavel Andreevich* – Master of Engineering sciences, Junior researcher, “Electrical and electronic systems”, Laboratory of the Test Center, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: pavelkuritsyn97@gmail.com.

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

УДК 66.022.55:631

**Цыбуленко П.В., Казаченко Г.В.***Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***ОСОБЕННОСТИ ПРЕССОВАНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАЛКОВЫХ ПРЕССАХ**

**Аннотация.** Рассматривается процесс прессования мелкозернистых материалов в валковых прессах с точки зрения влияния скорости прессования на интенсивность удаления воздуха из прессуемого материала, от которой зависит разжижение частиц в зоне прессования и, соответственно, производительность пресса. Получена аналитическая зависимость скорости удаляемого воздуха из прессуемого материала от геометрических размеров валков пресса, физико-механических характеристик материала и частоты вращения валков. Экспериментально определены критические скорости воздуха для перехода частиц удобрений хлористого калия в псевдоожигенное состояние. Получена зависимость критической скорости воздуха от критерия Архимеда, позволяющая аналитически определить частоту вращения валков с минимальным разжижением частиц в зоне прессования валкового пресса.

**Ключевые слова:** валковый пресс, прессование, псевдоожигение, воздух, частота вращения.

**Tsybulenka P.V., Kazachenko G.V.***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***FEATURES OF PRESSING FINE MATERIALS IN ROLL PRESSES**

**Abstract.** The process of compaction of fine-grained materials in rolls is considered from the point of view of the influence of the compaction speed on the intensity of air removal from the compacted material, on which the liquefaction of particles in the compaction zone and, accordingly, the productivity of the press depend. An analytical dependence of the speed of the air removed from the material being pressed on the geometric dimensions of the press rolls, the physical and mechanical characteristics of the material and the rotation frequency of the rolls has been obtained. The critical air velocities for the particles of fertilizers of potassium chloride are experimentally determined for their transition to a fluidized state. The dependence of the critical air speed on the Archimedes criterion is obtained, which allows to analytically determine the frequency of rotation of the rolls with minimal dilution of particles in the pressing zone of the roll press.

**Keywords:** roller press, pressing, fluidization, air, rotational speed.

**Введение.** На обогатительно-перерабатывающих производствах для прессования мелкозернистых материалов нашли широкое применение валковые прессы. Так для получения гранулированных удобрений КСI в ОАО «Беларуськалий» при их прессовании используют валковые прессы. Также они используются для прессования угольной крошки и различных отходов горного производства.

Производительность пресса зависит от таких факторов как размеры валков, их скорость вращения, размеры спрессованного продукта и физико-механические свойства прессуемого материала. Одним из факторов увеличения производительности пресса является повышение скорости прессования.

С точки зрения теории прессования, силы молекулярного взаимодействия между частицами материала при их обжатии проявляются мгновенно и не зависят от времени обжатия, что дает основание считать возможным увеличение скорости прессования без

снижения качества продукта [1]. С другой стороны, увеличение скорости прессования приводит к увеличению скорости удаления воздуха из прессуемого материала. В зоне прессования возникает вертикальный воздушный поток, который создает выброс мелких частиц прессуемого материала из рабочей камеры пресса. Это приводит к снижению насыпной плотности прессуемого материала, а соответственно – и производительности пресса. Также, снижается прочность плитки за счет того, что часть воздуха, не успев выйти из него, увеличивает пористость и, соответственно, механическую прочность плитки. С целью уменьшения выброса частиц прессуемого материала воздушным потоком в прессах применяют соответствующие механизмы, такие как подпрессователи и отсекатели.

Целью данной работы является обоснование скорости прессования сыпучих материалов в валковом прессе, при которой будет отсутствовать выброс частиц воздушным потоком из камеры прессования, с учетом геометрических размеров валков, их кинематических параметров, свойств прессуемого материала.

**Основная часть.** Рассмотрим процесс прессования сыпучего материала между двумя цилиндрическими валками радиусом  $R$  и длиной  $L$ , вращающимися навстречу друг другу с угловой скоростью  $\omega$  (рисунок 1).

Расстояние между боковыми поверхностями валков по осям вращения примем равным толщине плитки  $h$ .

Процесс уплотнения материала начинается с точки  $A$ , определяемой углом захвата  $2\alpha$ , по дуге  $AB$  и заканчивается на линии центров валков  $OO_1$ . По рекомендациям [1] угол захвата должен быть меньшим или равен двум углам внутреннего трения  $\varphi$  прессуемого материала. Объем прессуемого материала, заключенный между дугами  $AB$  и  $CD$  равен:

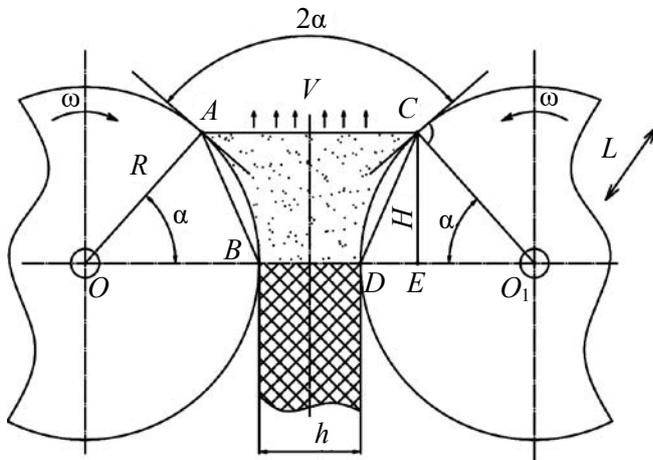


Рисунок 1. – Схема зоны прессования в валковом прессе

$$V = S \cdot L, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь тела прессования;

$L$  – длина рабочей зоны валков.

Площадь тела прессования равна:

$$S = S_{\text{тр}} - 2S_c, \quad (2)$$

где  $S_{\text{тр}}$  – площадь трапеции  $ABDC$ ;

$S_c$  – площадь сегмента  $AB$ .

Тогда, в соответствии с рисунком 1:

$$S_{\text{тр}} = R \sin \alpha [h + R(1 - \cos \alpha)], \quad (3)$$

$$S_c = \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi}{180} \alpha - \sin \alpha \right). \quad (4)$$

Объем прессуемого материала будет равен:

$$V = R \sin \alpha [h + R(1 - \cos \alpha)] \cdot L - R^2 \left( \frac{\pi}{180} \alpha - \sin \alpha \right) \cdot L. \quad (5)$$

В процессе обжатия прессуемого материала в зоне деформации его объем уменьшается на величину объема вытесненного воздуха  $V_B$ . Тогда:

$$V_B = V - V_{\text{п}}, \quad (6)$$

где  $V_{\text{п}}$  – объем спрессованной плитки.

Известно, что при прессовании отношение объема материала до прессования к объему спрессованной плитки, обратно пропорционально их плотностям [2]:

$$\frac{V}{V_{\Pi}} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{\text{н}}}, \quad (7)$$

где  $\rho_{\text{н}}$  – насыпная плотность прессуемого материала;

$\rho_{\Pi}$  – плотность плитки.

Тогда, из выражения (7) объем плитки будет равен:

$$V_{\Pi} = V \left( \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\Pi}} \right). \quad (8)$$

При подстановке в формулу (6) уравнения (8), получим:

$$V_{\text{в}} = V \left( 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\Pi}} \right). \quad (9)$$

Этот объем воздуха удаляется за время  $t$ , равное времени обжатия материала при повороте валков на угол  $\alpha$ , которое определяется [1]:

$$t = \frac{\alpha}{360n}, \quad (10)$$

где  $n$  – частота вращения валков,  $\text{с}^{-1}$ .

Производительность по удаляемому воздуху из зоны прессования определится как:

$$\frac{V_{\text{в}}}{t} = v \cdot AC \cdot L, \quad (11)$$

где  $v$  – скорость удаляемого воздуха на высоте  $H$  начала зоны деформации материала.

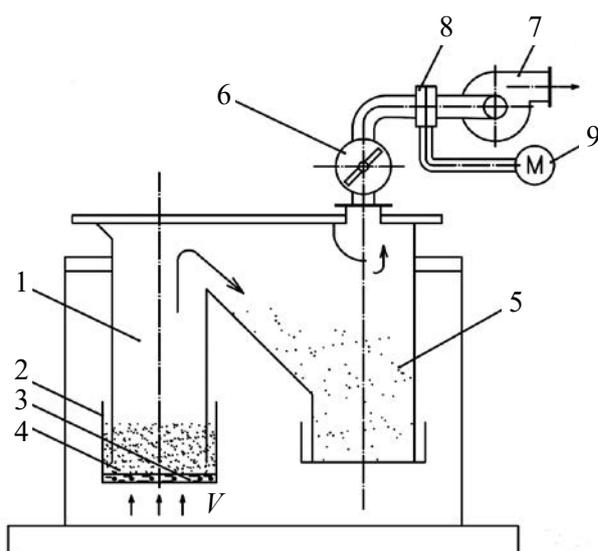
Из (11) с учетом зависимостей (5), (9), (10) и, учитывая, что  $AC = 2R - 2R \cdot \cos \alpha + h$ , эта скорость определится:

$$v = \frac{\left\{ R \sin \alpha [h + R(1 - \cos \alpha)] - R^2 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right) \right\} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\Pi}} \right) \cdot 360n}{(2R - 2R \cos \alpha + h) \cdot \alpha}. \quad (12)$$

Скорость удаляемого воздуха из зоны прессования определяет режим поведения частиц. В зависимости от величины этой скорости возможны два режима: режим фильтрации, когда воздух проходит сквозь неподвижный слой материала, и режим псевдооживления (кипения), когда весь прессуемый материал переходит в состояние непрерывного перемещения частиц с частичным их выбросом за пределы основной массы. Переход от режима фильтрации к режиму псевдооживления характеризуется критической скоростью псевдооживления  $v_{\text{кр}}$  и зависит от физико-механических свойств прессуемого материала. За критическую скорость псевдооживления нами принята та скорость воздуха, при которой в состоянии перемешивания находится не менее 90 % объема прессуемого материала [3].

В лаборатории кафедры «Горные работы» Белорусского национального технического университета выполнены экспериментальные исследования по определению критической скорости псевдооживления для частиц хлористого калия мелкозернистого ГОСТ 4568-83.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 2. Установка состоит из прозрачного цилиндра 1, к которому присоединяется стакан 2 с пористой решеткой 3. В стакан 2 помещается исследуемый образец 4. Цилиндр 1 соединяется с объемным осадителем частиц 5, выходной патрубком которого присоединен через заслонку 6 с венти-



**Рисунок 2.** – Схема лабораторной установки определения критической скорости псевдооживления

лятором 7. К выходному патрубку подсоединена измерительная диафрагма 8 с микроманометром 9.

Опыты проводились в следующей последовательности. При включенном вентиляторе 7 заслонкой 6 постепенно увеличивалась скорость продуваемого воздуха через материал в стакане 2 до состояния его перехода в псевдооживленное состояние. При состоянии кипения материала фиксировался перепад давления в диафрагме 8 микроманометром 9. По показаниям микроманометра рассчитывался расход воздуха  $Q$  в выходном патрубке, а затем определялась критическая скорость:

$$v_{кр} = \frac{Q}{S}, \quad (13)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения стакана 2.

При обработке опытных данных средний диаметр частиц  $d_{ср}$  определялся как среднее арифметическое размеров отверстий соседних сит, на которых осуществлялось рассеивание частиц по фракциям:

$$d_{ср} = \frac{d_n + d_{n-1}}{2}.$$

Плотность частиц фракций принята по результатам исследований, представленных в работе [4].

Результаты опытов и расчеты критической скорости псевдооживления различных фракций хлористого калия приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** – Результаты опытов по определению критической скорости псевдооживления хлористого калия

№	Размер сит $d_n \div d_{n-1}$ , мм	Средний размер частиц $d_{ср}$ , мм	Плотность частиц $\rho_{ч}$ , кг/м <sup>3</sup>	Критическая скорость $v_{кр}$ , м/с
1	5-4	4,5	2017	1,56
2	4-3	3,5	2058	1,07
3	3-2,5	2,75	2098	0,83
4	2,5-2	2,25	2132	0,78
5	2,0-1,6	1,80	2170	0,54
6	1,6-1,0	1,30	2229	0,38
7	1,0-0,63	0,82	2309	0,27
8	0,63-0,40	0,52	2397	0,15
9	0,40-0,31	0,36	2470	0,10
10	0,31-0,2	0,26	2536	0,08
11	0,2-0,16	0,18	2614	0,05

Влияние размеров частиц и их плотности на критическую скорость псевдооживления наиболее полно можно представлять в критериальном виде:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = f(A_r), \quad (14)$$

где  $\text{Re}_{\text{кр}}$  – число Рейнольдса, соответствующее критической скорости псевдооживления:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = v_{\text{кр}} \cdot \frac{d}{\nu}, \quad (15)$$

где  $d$  – размер частиц;

$\nu$  – кинематическая вязкость псевдооживляющей среды.

Критерий Архимеда определялся как:

$$A_r = \frac{gd^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_{\text{ч}} - \rho}{\rho}, \quad (16)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность исследуемых частиц;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\rho$  – плотность воздуха.

Обработка опытных данных методом наименьших квадратов дает зависимость:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = 0,008A_r^{0,69}. \quad (17)$$

По значениям критической скорости псевдооживления для каждой фракции прессуемого материала, и приняв в зависимости (12) скорость воздуха на высоте  $H$  зоны деформации равной  $v_{\text{кр}}$ , определим критическую частоту вращения валков пресса, при которой наступает режим кипения частиц:

$$n_{\text{кр}} = \frac{(2R - 2R \cos \alpha + h) \alpha \cdot v_{\text{кр}}}{\left\{ R \sin \alpha [h + R(1 - \cos \alpha)] - R^2 \left( \frac{\pi \alpha}{180} - \sin \alpha \right) \right\} \left( 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{п}}} \right)} \cdot 360, \quad \text{с}^{-1}. \quad (18)$$

В таблице 2 приведены данные критической частоты вращения валков пресса PWG1000×1240 для различных фракций частиц калия хлористого мелкозернистого, вычисленной по зависимости 18.

Таблица 2. – Результаты определения критической частоты вращения валков пресса

Показатель	Значения						
	3,5	2,75	1,8	1,3	0,82	0,36	0,18
средний размер частиц $d_{\text{ср}}$ , мм	3,5	2,75	1,8	1,3	0,82	0,36	0,18
критическая скорость псевдооживления $v_{\text{кр}}$ , м/с	1,07	0,83	0,54	0,38	0,27	0,10	0,05
критическая частота вращения валков $n_{\text{кр}}$ , с <sup>-1</sup>	2,07	1,61	1,04	0,73	0,52	0,19	0,10

Расчеты производились для пресса PWG1000×1240 с размерами валков радиусом  $R = 0,5$  м и длиной  $L = 1,24$  м. Значения физико-механических свойств прессуемых частиц принимались по данным [5]: насыпная плотность прессуемых частиц  $\rho_{\text{н}} = 1050$  кг/м<sup>3</sup> и плотность спрессованной плитки  $\rho_{\text{п}} = 1990$  кг/м<sup>3</sup>. Угол  $\alpha$  принимался равным углу трения  $\varphi$  и составлял 35°, толщина плитки принята  $h = 0,008$  м.

Анализ результатов по определению критической частоты вращения показывает, что с уменьшением среднего размера прессуемых частиц она уменьшается и, соответственно, должна определяться для каждого вида прессуемого материала с учетом геометрических размеров валков пресса и толщины плитки.

**Заключение.** Проведенные в работе исследования позволили определить скорость удаления воздуха из зоны прессования в валковом прессе в зависимости от размеров валков и физико-механических свойств прессуемого материала. На основании этого предложена методика определения частоты вращения валков пресса, при которой будет отсутствовать выброс воздушным потоком прессуемых частиц из зоны прессования, что является важным при проектировании и эксплуатации валковых прессов.

#### Список использованных источников

1. Горфин, О.С. Машины и оборудование по переработке торфа / О.С. Горфин. – М.: Недра, 1990. – 318 с.
2. Наумович, В.М. Теоретические основы процесса брикетирования торфа / В.М. Наумович. – Минск: Издательство академии наук Белорусской ССР, 1960. – 195 с.
3. Забродский, С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое / С.С. Забродский. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 428 с.
4. Кислов, Н.В. Плотностные свойства измельченной калийной руды и продуктов переработки / Н.В. Кислов, П.В. Цыбуленко // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 1. – С. 27-31.
5. Нормы технологического проектирования предприятий калийной и соляной промышленности: утв. Белнефтехимпром 28.08.96. Часть 2: Флотационные и галургические обогатительные фабрики. – Минск, 1996. – 232 с.

#### Информация об авторах

*Цыбуленко Петр Васильевич* – 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: ptsybulenka@bntu.by.

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

#### Information about the authors

*Tsybulenka Petr Vasilievich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the department “Mining operations”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Belarus), e-mail: ptsybulenka@bntu.by.

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

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

УДК 625.144.5/7

**Довгяло В.А., Девицкий Д.С., Максимчик К.В.***УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь***АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОДБИВОЧНЫХ БЛОКОВ ПУТЕВЫХ МАШИН**

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы анализа основных факторов, оказывающих определяющее влияние на работоспособность рабочих органов путевых машин при восстановлении щебеночного балласта железнодорожного пути. Изучены режимы работы подбивочных блоков выправочно-подбивочно-рихтовочных машин при уплотнении щебеночного балластного слоя рельсошпальной решетки, выправке пути и отделке балластной призмы, а также мероприятия по восстановлению рабочих органов, включая выбор износостойких сплавов и перспектив их использования в качестве материалов подбоек.

**Ключевые слова:** путевая выправочно-подбивочно-рихтовочная машина, рельсошпальная решетка, балластный слой, рабочий орган, подбивочный блок, подбойка, износостойкий материал.

**Dovgyalo V.A., Devitsky D.S., Maksimchyk K.V.***Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus***ANALYSIS OF FACTORS THAT AFFECT THE PERFORMANCE OF ROAD VEHICLE PADDING BLOCKS**

**Abstract.** The article deals with the analysis of the main factors that have a decisive influence on the performance of the working bodies of track machines during the restoration of crushed stone ballast of the railway track. The modes of operation of the lining blocks of the surfacing-tamping-finishing machines during compaction of the crushed stone ballast layer of the rail-sleeper grating, track straightening and finishing of the ballast prism, as well as measures to restore the working bodies, including the choice of wear-resistant alloys and the prospects for their use as lining materials, are studied.

**Keywords:** track surfacing-tamping-finishing machine, rail-sleeper grid, ballast layer, working body, padding block, padding, wear-resistant material.

**Введение.** Основой железнодорожного транспорта является путь с направляющей рельсовой колеей, по которой осуществляется движение поездов. Под динамическим воздействием нагрузок от подвижного состава, а также под влиянием природных факторов с течением времени в конструкции пути постепенно накапливаются остаточные деформации, усталостные напряжения и износ. Вместе с тем, для любых климатических условий в любое время года конструкция железнодорожного пути должна быть прочной, устойчивой, стабильной и износостойкой, обеспечивающей безопасное движение поездов с максимально допускаемыми скоростями.

Для поддержания пути в технически исправном состоянии, помимо непрерывно осуществляемого в течение всего года текущего содержания пути, через определенные промежутки времени назначают и выполняют различные виды плановых ремонтных работ.

Регламентом путевых работ предусмотрено осуществление текущего содержания и выполнение подъемочного, среднего и капитального ремонтов пути, сплошной смены рельсов, капитального ремонта переездов, а в необходимых случаях – реконструкции пути [1].

Текущее содержание железнодорожного пути осуществляют дистанции пути, а производство больших и трудоемких объемов ремонтных работ на Белорусской железной дороге выполняют структурные подразделения Республиканского унитарного предприятия «Ремпуть Белорусской железной дороги», а также Государственное предприятие «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги».

**Классификация машин для уплотнения балластной призмы, выправки и отделки пути.** Ряд путевых работ, связанных с реконструкцией, ремонтом и текущим содержанием пути, осуществляют различными по конструкции и назначению путевыми машинами и механизмами. В их числе машины для уплотнения балластной призмы, выправки и отделки пути. Их классифицируют по ряду признаков: назначению, периодичности действия и числу одновременно подбиваемых шпал (одиночной и групповой подбивки). В таблице 1 представлена их классификация, из которой следует, что машины разделяют на три группы по периодичности действия – циклического, непрерывно-циклического и непрерывного действия [2].

Таблица 1. – Классификация машин для уплотнения балластной призмы, выправки и отделки пути

Циклического действия	Непрерывно-циклического действия	Непрерывного действия
Шпалоподбивочные - однопалочные; - одношпальные	Магистральные выправочно-рихтовочные путевые машины	Выправочно-подбивочно-отделочные (ВПО)
Магистральные выправочно-подбивочно-рихтовочные - однопалочные; - одношпальные; - многошпальные		Шпалоподбивочные
Универсальные выправочно-подбивочно-рихтовочные - однопалочные; - одношпальные с двумя блоками; - одношпальные с четырьмя блоками		Выправочно-подбивочно-рихтовочные
Путерихтовочные		Для динамической стабилизации пути (ДСП)
Для уплотнения балласта в шпальных ящиках и откосноплечевых зонах		Для уплотнения балласта в откосноплечевых зонах
Механизированный инструмент		Путерихтовочные

При выполнении работ по выправке железнодорожного пути в продольном, поперечном профиле и в плане, а также уплотнению балласта наиболее производительными показали себя выправочно-подбивочно-рихтовочные (ВПР) путевые машины, которые применяют также при строительстве, ремонте и текущем содержании пути.

На рисунке 1 представлена схема самоходной ВПР машины, которая состоит из рамы 2, кабин управления машиниста и оператора 1, приводных ходовых тележек 3, ударно-тягового устройства 5 и рабочих органов в виде подбивочных блоков 4, которые обеспечивают уплотнение балластного слоя рельсошпальной решетки.

На Белорусской железной дороге имеется внушительный парк машин ВПР зарубежного производства, подавляющее большинство из которых выпускает компания «Plasser&Theurer» (Австрия).

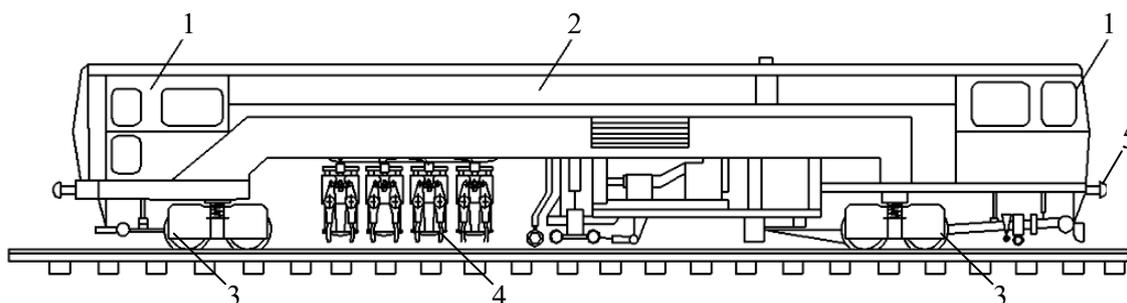
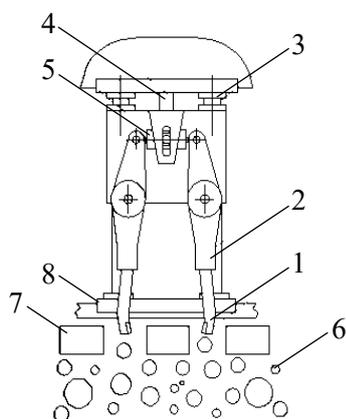


Рисунок 1. – Схема ВПР машины

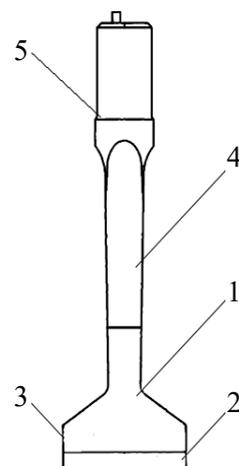
Рабочий цикл подбивки щебня представляет собой совокупность сложных операций, необходимых для его перемещения и уплотнения балласта под шпалой. При уплотнении балласта используют метод виброобжатия, сочетающий вибрационное воздействие рабочего органа (в горизонтальном, вертикальном или ином направлении) с его принудительной подачей. На рисунке 2 представлена схема подбивочного блока машины ВПР, который состоит из корпуса 2, в котором шарнирно установлены подбойки 1. Заглубление подбоек в щебень производят гидроцилиндрами 4 по направляющим 3, а виброобжатие балласта – гидроцилиндрами 5.

Основным элементом подбивочного блока является подбойка (рисунок 3) – монолитная деталь, которую условно можно разделить на три части: конус 5, стержень 4 и лопатку 2.



1 – подбойка; 2 – корпус; 3 – вертикальная направляющая; 4 – гидроцилиндр для вертикального перемещения подбивочного блока; 5 – гидроцилиндр для виброобжатия балласта при сведении и разведении подбоек; 6 – щебеночный балласт; 7 – шпала; 8 – рельс

Рисунок 2. – Схема подбивочного блока машины ВПР



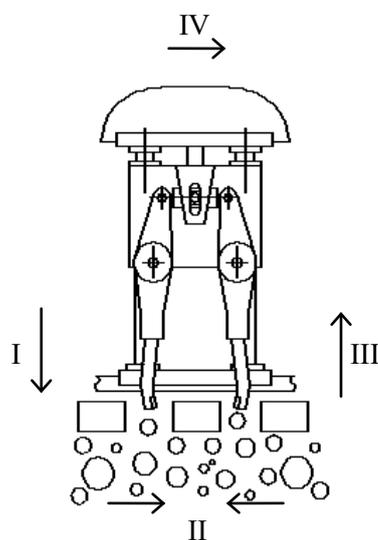
1 – шейка; 2 – лопатка (рабочая поверхность); 3 – боковые стороны; 4 – стержень; 5 – конус  
Рисунок 3. – Схема подбойки подбивочного блока

Конус 5 служит для установки и закрепления подбойки в рычагах подбивочного блока (его выполняют в виде конуса или цилиндра). Стержень 4 способствует заглублению лопатки 2 ниже подошвы шпал. Лопатка 2 (с наплавленным слоем твердосплавного материала) непосредственно контактирует со щебнем и обеспечивает подачу балласта под шпалу и передачу частицам щебня вибровоздействия.

При подбивке балласта в подшпальной зоне его уплотняют различными методами в зависимости от конструкции рабочего органа: в машинах циклического или непрерывно-циклического действия – виброобжатием лопатками единичных подбоек (со

стороны продольных кромок шпал); в машинах непрерывного действия – виброобжатием лопатками подбоек, сгруппированных в подбивочные агрегаты (сателлиты), состоящие из нескольких блоков подбоек.

**Технологические процессы производства работ подбивки балласта машинами различного по периодичности действия.** В машинах циклического действия технологический процесс уплотнения (рисунок 4) состоит из следующих операций: за-



I – заглабление подбоек;  
II – виброобжатие; III – подъем подбоек; IV – постоянная скорость передвижения машины  
Рисунок 4. – Технологический процесс подбивки балласта машиной циклического действия (операции I, II, III) и машиной непрерывно-циклического действия (операции I, II, III, IV)

глубления подбоек в балласт I, виброобжатия II при сведении к шпале лопаток, раскрытия подбоек, подъема подбивочного блока III и его перемещения для обработки следующей шпалы или групп шпал.

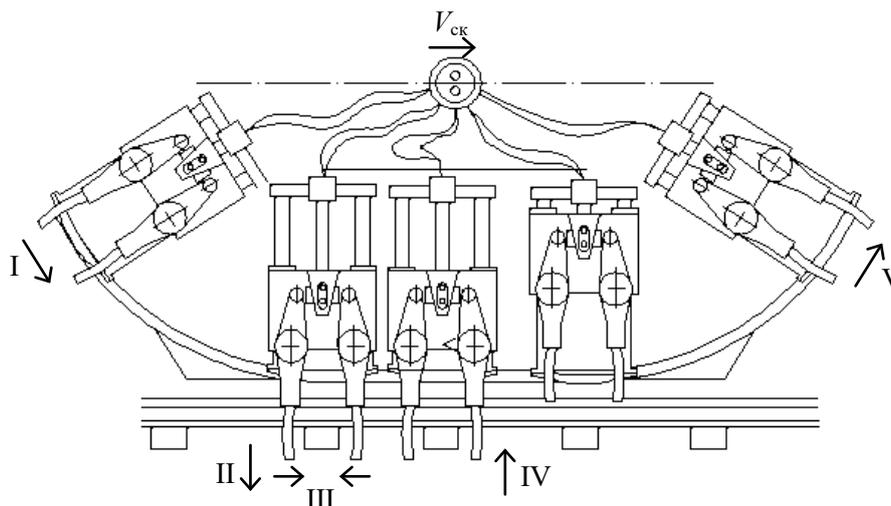
Процесс подбивки балласта машинами непрерывно-циклического действия (рисунок 4) аналогичен процессу подбивки машинами циклического действия. Различие состоит лишь в принудительной подаче балласта в подшпальную зону клином (на рисунке не показан) при движении машины IV с постоянной скоростью.

Лопатки подбоек внедряются в насыпной щебень и принудительно уплотняют его, испытывая при этом значительное абразивное воздействие частиц щебня, которое сопровождается износом рабочей поверхности лопаток и, в ряде случаев, изломом стержней.

Взаимодействие лопаток со щебнем в машинах циклического действия происходит на всех стадиях технологического процесса: при заглаблении подбоек, обжатии балласта при сведении к шпале лопаток, раскрытии подбоек, при подъеме и перемещении для обработки следующей шпалы или группы шпал.

Для машин непрерывного действия наиболее перспективной является конструкция подбивочного блока, представленная на рисунке 5. Для него характерна непрерывная работа при постоянной скорости движения машины. Как видно из рисунка, подбивочные блоки передвигаются по металлической ферме и подаются I поочередно к месту подбивки шпал, производят рабочий цикл заглабления II, виброобжатия III, подъема блока IV в транспортное положение и далее передвигаются по ферме V. При этом значительно возрастает интенсивность взаимодействия подбоек со щебнем.

**Характер взаимодействия рабочих органов подбоек.** Ресурс подбоек и производительность выправочно-подбивочно-рихтовочных машин для стрелочных переводов (ВПРС) меньше, чем у ВПР (таблица 2). Это обусловлено технологией выполнения работ по подбивке балласта на стрелочных переводах меньшим количеством подбоек в подбивочном блоке, а также более тяжелыми условиями работы ВПРС машин на при вокзальных путях. Нередко бывают разрушения подбоек при подбивке стрелочных переводов. Стоит также отметить относительно невысокий ресурс подбоек высокопроизводительных машин типа ВПО, что связано с их непрерывным взаимодействием с абразивной средой [3].



I – подача блока; II – заглубление подбоек; III – виброобжатие;  
 IV – подъем блока; V – перемещение блока;  $V_{ск}$  – скорость передвижения машины  
 Рисунок 5. – Технологический процесс подбивки балласта машиной непрерывного действия

Таблица 2. – Технические характеристики путевых машин

Параметр	ВПР-02	ВПРС-02	ВПР-1200	ВПРС-500	ВПО-3000
Производительность, шпал/ч	до 1400	до 700	до 1200	до 500	до 3000
Производительность, стрелочн. переводов/ч	-	1,2	-	1,0	-
Мощность дизеля, кВт	220	220	176	176	220
Число подбивочных блоков, штук	2	2	2	2	2
Число подбоек в подбивочном блоке, штук	2×8	4	2×8	4	2×8

Характер взаимодействия основных рабочих органов путевых машин (именно подбоек) обусловлен процессами активного абразивного изнашивания в результате взаимодействия со щебеночным балластом, а также другими причинами – интенсивными динамическими нагрузками, вибрацией, изгибающими моментами и высокой температурой. Следствием воздействия упомянутых факторов являются выкрашивание материала подбойки, трещины на рабочей поверхности и шейки подбойки.

Цикл подбивки шпалы (т.е. совокупность операций, необходимых для уплотнения балласта под одной шпалой и перемещения машины к другой шпале) в среднем составляет семь секунд при производительности современных путевых машин до 4000 шпал/ч. Срок службы подбоек в зависимости от типа путевой машины и материала, из которого она изготовлена, составляет от 40 до 100 км. Износ подбоек является главной проблемой при эксплуатации машины в режиме подбивки щебеночного балласта. Стоимость заводских подбоек, а также их ремонт и восстановление является довольно дорогостоящим процессом. В связи с этим актуальной является разработка износоустойчивого, ремонтпригодного и экономически выгодного материала подбойки [4].

**Восстановление рабочих органов подбоек.** В настоящее время для восстановления лопаток машин ВПР применяют большую группу наплавочных материалов, различных по структуре, химическому составу и характеристикам. Условия эксплуатации подбоек исключают использование многих методов напыления из-за низкой работоспо-

способности покрытий при абразивном изнашивании. Для восстановления подбоек в основном используют электротермические методы наплавки. Один из наиболее распространенных и доступных в массовом ремонтном производстве способов ремонта лопаток – наплавка электродами типа Т-590В в два слоя, а при повышенном износе с наращиванием изношенной части лопатки путем приварки пластин из рессорной стали с предварительным прогревом детали до температуры  $(225 \pm 25)^\circ\text{C}$ . Для восстановления геометрии лопатки подбоек используют, в том числе, приварку пластин из стали 45 с последующей наплавкой слоя износа тугоплавкими электродами, что обеспечивает твердость направленных слоев в пределах от 60 до 62 HRC. Однако этот способ не дает требуемого ресурса подбоек в сравнении с оригинальными деталями. Ресурс восстановленных подбоек составляет всего от 8 до 15 км обработанного пути.

Плазменное напыление и индукционная наплавка, несмотря на достижение однородности металла обрабатываемой и наплавленной поверхностей, не дают ожидаемых результатов, поскольку оптимальная толщина наплавляемого металла находится в пределах от 2 до 5 мм, а износ лопатки превышает указанные размеры и имеет нелинейные формы.

Наиболее универсальными являются порошковые проволоки на основе хрома и никеля, которые дают высокую твердость наплавленного слоя, высокую износостойкость материала в условиях абразивного изнашивания, а наличие марганца значительно повышает ударную вязкость наплавленных слоев.

Низкая себестоимость процесса восстановления позволяет применять данный способ на малых ремонтных предприятиях при отсутствии высокотехнологичного оборудования и оснастки.

Все перечисленные способы восстановления изношенных поверхностей подбоек дают эффект, способствующий продлению ресурса их работы, но, очевидно, недостаточный для обеспечения безотказной работы подбивочного блока машины ВПР с заданной производительностью и максимальным качеством выполняемых работ.

На некоторых ремонтных предприятиях применяют в путевых машинах подбойки собственного производства. Их изготавливают из заготовок из конструкционной легированной стали марки 38ХМ, которая имеет в составе такие легирующие элементы как хром и молибден. Так, при содержании в составе хрома в количестве от 0,5 до 1,5 % повышается прочность и твердость состава, а также улучшается прокаливаемость. Молибден, в свою очередь, повышает прочность, упругость и красностойкость сплава. Подбойки из стали 38ХМ обеспечивают подбивочному блоку заданный ресурс при температурах до  $400^\circ\text{C}$ .

Российские производители применяют при изготовлении подбоек углеродистые качественные и легированные стали, в их числе стали 45, 40, 40ХН, 110Г13Л. Европейские и американские производители – сплавы железа с добавлением меди, хрома, вольфрама и никеля. Они гораздо дороже, но имеют ресурс в 2 раза больше подбоек российского производства [5].

Для исследований был выбран ряд компонентов. В их числе хром, который повышает способность сталей к термическому упрочнению и увеличивает сопротивление абразивному износу; никель, способствующий упрочнению; марганец, который увеличивает стойкость к ударным нагрузкам, не уменьшая пластичности, а также молибден и вольфрам, которые повышают усталостную прочность, твердость и износостойкость сталей.

**Вывод.** Анализ результатов исследований влияния содержания легирующих добавок на износостойкость образцов с использованием компьютерной модели, имитирующей рабочую поверхность подбоек, показывает высокую работоспособность сплавов, содержащих в качестве основы железо-углерод с добавлением указанных леги-

рующих элементов. Определен состав сплавов, обеспечивающих их износостойкость в условиях абразивного износа и ударных нагрузок. Таким образом, результаты компьютерного моделирования свидетельствуют о повышении ресурса подбоек и увеличении межсервисного интервала обслуживания рабочего оборудования машин в несколько раз, что положительно сказывается на технико-экономических показателях, а также времени безотказной работы подбивочных блоков. Возможность повышения эксплуатационных показателей подбивочных блоков позволит решить проблему по импортозамещению дорогостоящих комплектующих, а также увеличит ресурс и ремонтпригодность рабочих органов и конструкций машин ВПР.

### Список использованных источников

1. Блохин, К.А. Ремонт железнодорожного пути / К.А. Блохин, С.А. Пашинин. – М.: Транспорт, 1976. – 360 с.
2. Попович, М.В. Путевые машины: учебник для вузов ж.-д. транспорта / М.В. Попович, В.М. Бугаенко, Б.Г. Волковойнов. – М.: Желдориздат, 2007. – 756 с.
3. Бабич, А.В. Ремонт машин в строительстве и на железнодорожном транспорте / А.В. Бабич, А.Л. Манаков, С.В. Щелоков. – М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2015. – 124 с.
4. Абашин, В.М. Путевые машины на железнодорожном транспорте / В.М. Абашин. – М.: УМЦ МПС России, 2002. – 29 с.
5. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для машиностроительных вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.

### Информация об авторах

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

*Девитский Дмитрий Сергеевич* – аспирант кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bsut@bsut.by.

*Максимчик Кирилл Вячеславович* – магистр, ассистент 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

*Dovgyalo Vladimir Aleksandrovich* – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department of “Transport-technological machines and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

*Devitsky Dmitry Sergeevich* – Post-graduate Student, “Transport-technological machines and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

*Maksimchyk Kiryl Vyachaslavovich* – Master's Degree, Assistant of the Department “Transport and Technological Machines and Equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bsut@bsut.by.

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

УДК 621.65.01

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

**Аннотация.** Уточнены зависимости для расчета скоростей и давления среды на лопасти радиальной 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:** радиальная турбина, изменение угла наклона лопастей, направление потока, скорости, давление среды, отдельные участки лопастей.

**Pavlechko U.N.***Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***PARAMETERS OF THE MEDIUM IN THE CHANNELS OF A RADIAL  
TURBINE WHEN THE ANGLE OF INCLINATION OF THE BLADES CHANGES**

**Abstract.** The dependences for calculating the velocity and pressure of the medium on the blades of a radial-axial turbine when the angle of inclination of individual sections of the blade changes are clarified. The velocity of the medium in the direction perpendicular to the plane of the blade in tangential and radial directions and the pressure medium in the tangential direction are expressed by similar dependencies and differ only in the angles of the sections of the blades. Formulas for determining the pressure in the direction perpendicular to the plane of the blade and the radial direction differ both in the angles of inclination of the sections and in the calculated dependencies.

**Keywords:** radial turbine, change in the angle of inclination of the blades, flow direction, velocity, pressure of the medium, individual sections of the blades.

**Введение.** Основным уравнением при определении параметров радиальной 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.

Проведенными ранее исследованиями получены зависимости для определения скоростей движения среды и лопасти, а также давления среды на лопасть при вводе потока радиально [3] и под некоторым углом  $\alpha$  к направлению, обратному окружной скорости (рисунок 1) [4, 5]. Найденные выражения справедливы только для начального участка лопасти по ходу движения рабочей среды при постоянном радиусе. При дальнейшем движении среды в межлопастном пространстве направление и ее скорость изменяются, и при достаточно большой длине лопастей она выходит из турбины практически параллельно плоскости лопасти, не оказывая активного влияния на ее вращение.

Начальная скорость среды  $v_{si}$  представлена в виде тангенциальной  $v_{sui}$  и радиальной  $v_{sri}$  составляющих (рисунок 1). С этими скоростями среда воздействует на эле-

ментарный участок лопасти  $AB$  в тангенциальном и радиальном направлениях, величины которых определяются зависимостями [4-6]:

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

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

Обобщенные скорости движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти  $c_i$ , а также в тангенциальном  $c_{ui}$  и радиальном  $c_{ri}$  направлениях (рисунок 2) определяются соответствующими выражениями [4, 5]:

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

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

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

где  $\beta$  – угол между участком лопасти и касательной к окружности лопастей турбины, град (рад).

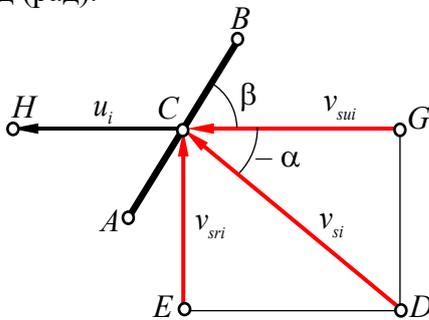


Рисунок 1. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку

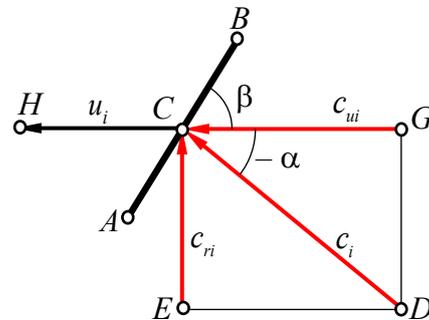


Рисунок 2. – Обобщенные скорости воздействия среды на элементарную площадку

Окружная скорость  $u_i$  элементарного участка лопасти  $AB$  определяется зависимостью от начальной скорости среды  $v_{si}$  [4, 5]:

$$u_i = v_{si} \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}. \quad (6)$$

Обобщенные давления среды на лопасть в направлении, перпендикулярном плоскости элементарного участка лопасти  $p_i$ , в тангенциальном  $p_{ui}$  и радиальном  $p_{ri}$  направлениях выражаются соответствующими формулами [6]:

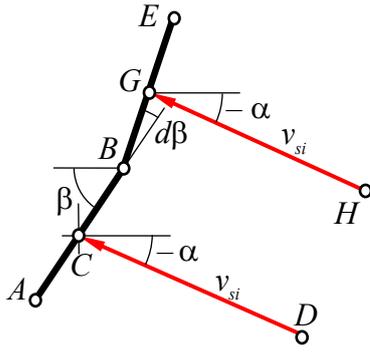
$$p_i = \rho v_{si}^2 \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2 \beta}; \quad (7)$$

$$p_{ui} = \rho v_{si}^2 \sin^2(\beta - \alpha); \quad (8)$$

$$p_{ri} = \rho v_{si}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin^2(\beta - \alpha), \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

**Результаты исследований.** Рассмотрим зависимость расчетных формул скоростей среды и создаваемых ею давлений на лопасть при других углах ее наклона. Предположим, что 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



**Рисунок 3. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарные площадки**

скоростью  $v_{si}$ , вектор между которой и касательной к окружности лопастей турбины имеет то же значение угла  $\alpha$  (рисунок 3).

Обобщенная скорость движения среды в направлении, перпендикулярном плоскости элементарного участка лопасти  $BE$ , по аналогии с формулой (3) определяется выражением:

$$c_{i+1} = v_{si} \sin(\beta + d\beta - \alpha) = v_{si} [\sin(\beta - \alpha) + \cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta + \sin \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta]. \quad (10)$$

При интегрировании второго и третьего членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол  $\alpha$  имеет постоянное значение,

$\beta_1 = \beta_i + d\beta$ , для малых углов  $\sin d\beta = d\beta$ , а согласно [7]:

$$\int \cos \beta d\beta = \sin \beta; \quad \int \sin \beta d\beta = -\cos \beta, \quad (11)$$

в результате решения получаем:

$$c_{i+1} = v_{si} \left[ \sin(\beta - \alpha) + \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos \beta d\beta + \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta d\beta \right] = v_{si} \sin(\beta_1 - \alpha). \quad (12)$$

Обобщенная скорость движения среды в тангенциальном направлении по аналогии с формулой (4) определяется зависимостью:

$$c_{u,i+1} = v_{si} \sin(\beta + d\beta) \cdot \sin(\beta + d\beta - \alpha) = v_{si} [\sin \beta \cdot \sin(\beta - \alpha) + 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta + \sin^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta - \cos^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta]. \quad (13)$$

В результате интегрирования второго, третьего и четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол  $\alpha$  не изменяется,  $\beta_1 = \beta_i + d\beta$ , для малых углов  $\sin d\beta = d\beta$ , и в соответствии с [7]:

$$\int \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta = \frac{\sin^2 \beta}{2}; \quad \int \sin^2 \beta d\beta = \frac{\beta}{2} - \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{2}; \quad \int \cos^2 \beta d\beta = \frac{\beta}{2} + \frac{\sin \beta \cdot \cos \beta}{2}, \quad (14)$$

в результате несложных преобразований получаем:

$$c_{u,i+1} = v_{si} \left[ \sin \beta \cdot \sin(\beta - \alpha) + 2 \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta + \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin^2 \beta d\beta - \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta d\beta \right] = v_{si} \sin \beta_1 \cdot \sin(\beta_1 - \alpha). \quad (15)$$

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

$$c_{r,i+1} = v_{si} \cos(\beta + d\beta) \cdot \sin(\beta + d\beta - \alpha) = v_{si} [\cos \beta \cdot \sin(\beta - \alpha) + 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot \sin d\beta + \cos^2 \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta - \sin^2 \beta \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta]. \quad (16)$$

При интегрировании второго, третьего и четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол  $\alpha$  имеет постоянное значение,  $\beta_1 = \beta_i + d\beta$ , для малых углов  $\sin d\beta = d\beta$ , с учетом (14) и [7]:

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

получаем:

$$c_{r,i+1} = v_{si} \left[ \cos \beta \cdot \sin(\beta - \alpha) + 2 \sin \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta + \right. \\ \left. + \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta d\beta - \cos \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \sin^2 \beta d\beta \right] = v_{si} \cos \beta_1 \cdot \sin(\beta_1 - \alpha). \quad (17)$$

Сравнение формул (3)-(5), характеризующих скорости воздействия среды на элементарный участок  $AB$ , наклоненный под углом  $\beta$  к направлению, обратному окружной скорости лопасти, с соответствующими формулами (12), (15) и (17), относящимися к элементарному участку лопасти  $BE$ , наклоненному под углом  $\beta_1$ , показывает, что они аналогичны и различаются только углами наклона участков.

Обобщенное давление среды в направлении, перпендикулярном плоскости  $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти, по аналогии с формулой (7) определяется зависимостью:

$$p_{i+1} = \rho v_{si}^2 \frac{\sin^2(\beta + d\beta - \alpha)}{\sin^2(\beta + d\beta)} = \rho v_{si}^2 \left[ \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2 \beta} + \right. \\ \left. + 2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cos 2\alpha \cdot \sin d\beta + \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta - \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta \right]. \quad (18)$$

При этом 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  $\alpha$  не изменяется,  $\beta_1 = \beta_i + d\beta$ , для малых углов  $\sin d\beta = d\beta$ , а согласно [7]:

$$\int \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta = \ln |\sin \beta|; \quad \int \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta = -\frac{\cos \beta}{\sin \beta} - \beta, \quad (19)$$

в результате решения получаем:

$$p_{i+1} = \rho v_{si}^2 \left[ \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2 \beta} + 2 \cos 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta + \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} d\beta - \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta \right] = \\ = \rho v_{si}^2 \left[ \frac{\sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2 \beta} + 2 \cos 2\alpha \cdot \ln \left| \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} \right| + \sin 2\alpha \left( \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} - \frac{\cos \beta}{\sin \beta} + 2\beta_1 - 2\beta \right) \right]. \quad (20)$$

Обобщенное давление среды в тангенциальном направлении для  $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти по аналогии с формулой (8) определяется выражением:

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

При этом 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  $\alpha$  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:

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

$$= \rho v_{si}^2 \left[ \sin^2(\beta - \alpha) + \cos 2\alpha (\sin^2 \beta_1 - \sin^2 \beta) + \sin 2\alpha (\sin \beta \cdot \cos \beta - \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1) \right]. \quad (22)$$

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 (22) упрощается до вида:

$$p_{u,i+1} = \rho v_{si}^2 \sin^2(\beta_1 - \alpha). \quad (23)$$

Обобщенное давление среды в радиальном направлении для  $(i+1)$ -го элементарного участка лопасти по аналогии с формулой (9) определяется зависимостью:

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

$$+ 2 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} \cos^2 \alpha \cdot \sin d\beta + 6 \cos^2 \beta \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta - 2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin d\beta -$$

$$\left. - 4 \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} \sin^2 \alpha \cdot \sin d\beta - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin d\beta \right]. \quad (24)$$

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 (24) приобретает вид:

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

$$\left. - \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin 2\alpha \cdot \sin d\beta - 2 \frac{\cos \beta}{\sin \beta} \cos^2 \alpha \cdot \sin d\beta \right]. \quad (25)$$

В результате интегрирования второго–четвертого членов правой части полученной зависимости с учетом того, что угол  $\alpha$  имеет постоянное значение,  $\beta_1 = \beta_i + d\beta$ , для малых углов  $\sin d\beta = d\beta$ , и с учетом (14), после несложных преобразований получаем:

$$p_{r,i+1} = \rho v_{si}^2 \left[ \frac{\cos^2 \beta \cdot \sin^2(\beta - \alpha)}{\sin^2 \beta} + 4 \cos 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^3 \beta}{\sin \beta} d\beta + 4 \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \cos^2 \beta \cdot d\beta - \sin 2\alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} d\beta - \right.$$

$$\left. - 2 \cos^2 \alpha \int_{\beta}^{\beta_1} \frac{\cos \beta}{\sin \beta} d\beta \right] = \rho v_{si}^2 \left[ \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \sin^2(\beta - \alpha) + 2(\cos^2 \beta_1 - \cos^2 \beta) \cos 2\alpha - \right.$$

$$\left. - 2 \ln \left| \frac{\sin \beta_1}{\sin \beta} \right| (\cos^2 \alpha - 2 \sin^2 \alpha) + \left( 2 \sin \beta_1 \cdot \cos \beta_1 - 2 \sin \beta \cdot \cos \beta + \frac{\cos \beta_1}{\sin \beta_1} - \frac{\cos \beta}{\sin \beta} + 3\beta_1 - 3\beta \right) \sin 2\alpha \right]. \quad (26)$$

Сравнение выражений давлений среды (7) и (9) с соответствующими им формулами (20) и (26) показывает, что они различаются не только углами наклона участков лопастей, но и расчетными зависимостями. Формулы (8) и (23) 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 зависимостями 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 центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Химическая промышленность. – 2017. – Т. 94, № 5. – С. 247-254.
4. Павлечко, В.Н. О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 52-64.
5. Павлечко, В.Н. О влиянии центробежной силы на работу радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 51-63.
6. Павлечко, В.Н. Изменение тангенциального давления среды на лопасти в каналах радиальной турбины / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2019. – № 3. – С. 29-35.
7. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1978. – С. 84-98.

#### Информация об авторе

*Павлечко Владимир Никифорович* – 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

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

Поступила в редакцию 23.04.2021 г.

УДК 622.232.83:622.243.56.054(045)

**Басалай Г.А.***Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь***ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИВОДОВ СООСНЫХ РОТОРОВ  
ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ТИПА ПКС-8 И КРП-3**

**Аннотация.** Разработаны динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3. Сформированы основные абстрактные элементы, наделенные определенными физическими свойствами: инерционные элементы, способные накапливать кинетическую энергию; упругие элементы, способные накапливать потенциальную энергию; диссипативные элементы, обладающие свойствами 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 двигателей и реактивным нагрузкам на соосных роторах.

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

**Basalai R.A.***Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***DYNAMIC DRIVE MODELS OF COAXIAL ROTORS OF TUNNELLING  
MACHINES OF THE TYPE PKS-8 AND KRP-3**

**Abstract.** Dynamic models of the drive of coaxial rotors of a tunnelling machine of the type PKS-8 and KRP-3 have been developed. The main abstract elements have been formed, possessing certain physical properties: inertial elements capable of accumulating kinetic energy; elastic elements capable of accumulating potential energy; dissipative elements displaying energy dissipation properties; transformer elements displaying inertialess transformations of energy flow parameters carried out by technical devices. In the dynamic system of the actuating device, external influences of the potential type are formulated, corresponding to the active moments of the engines and reactive loads on the coaxial rotors.

**Keywords:** tunnelling machine, coaxial rotors, drive, dynamic model.

**Введение.** Проходческие комбайны с соосными роторами типа ПКС-8 и КРП-3 широко используются на рудниках ОАО «Беларуськалий» при разработке Старобинского и Петриковского месторождений калийных солей [1, 2], а в ближайшей перспективе – Нежинского месторождения (ИООО «Славкалий»). Комбайн ПКС-8 является глубоко модернизированной отечественной горной машиной, прототип которой – проходческий комбайн ПК-8М. Проходческий комбайн КРП-3 – горная машина нового поколения этого класса, выпускаемая Солигорским Институтом проблем ресурсосбережения с Опытным производством.

Основное назначение комбайнов – проходка подготовительных выработок арочной формы при формировании шахтных полей для отработки калийных пластов очистными комплексами.

В рабочем режиме проходческого комбайна 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 значи-

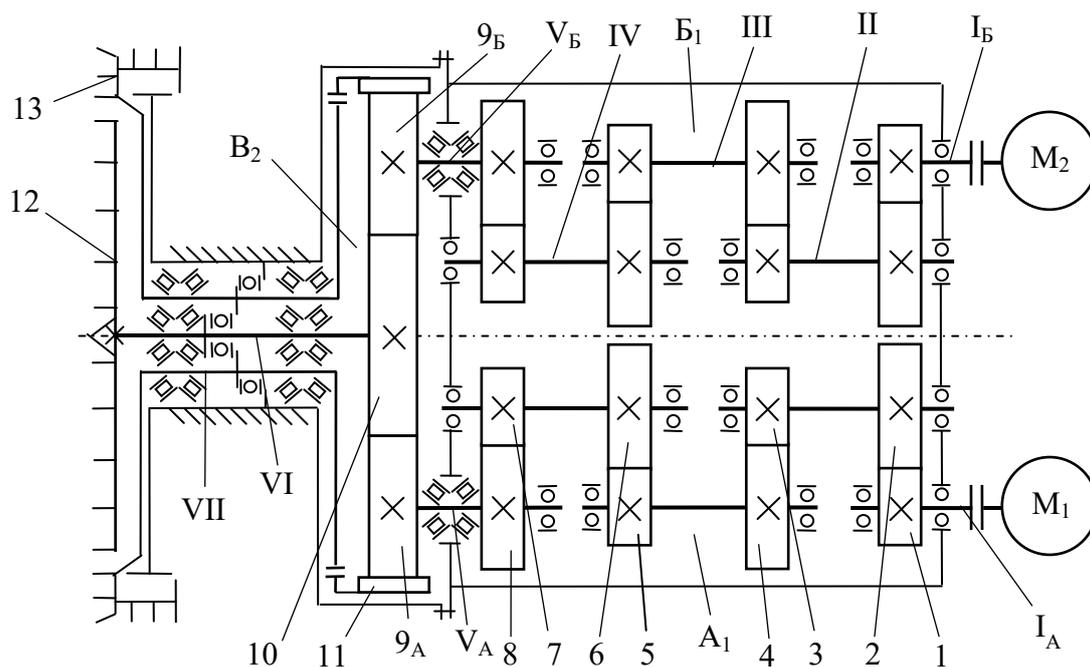
тельным динамическим нагрузкам. В связи с этим задачи модернизации конструкций и методов проектного расчета приводов исполнительных органов проходческих комбайнов актуальны и в настоящее время.

Цель работы – разработка динамических моделей приводов соосных роторов проходческих комбайнов.

**Результаты исследования.** В проходческих комбайнах ПК-8 и ПКС-8 приводы соосных роторов однотипные. Они включают в себя два кинематически последовательно соединенных редуктора (рисунок 1).

Первый из них представляет собой спаренный, двухпоточный, цилиндрический, четырехступенчатый редуктор  $A_1, B_1$  с двумя ведущими  $I_A, I_B$  и двумя ведомыми  $V_A, V_B$  валами, приводимый в действие от двух электродвигателей  $M_1, M_2$  по 110 кВт.

Второй – суммирующе-распределительный одноступенчатый цилиндрический редуктор  $B_2$  приводится в действие двумя параллельным потоками вращающих моментов от зубчатых колес  $9_A, 9_B$ , установленных консольно на ведомых валах первых редукторов. На консолях ведомых соосных валов VI, VII третьего редуктора закреплены основные фрезерующе-погрузочные исполнительные органы комбайна: центральный ротор 12 и ковшовая рама 13. 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].



I-VII – валы; 1-11 – зубчатые колеса;

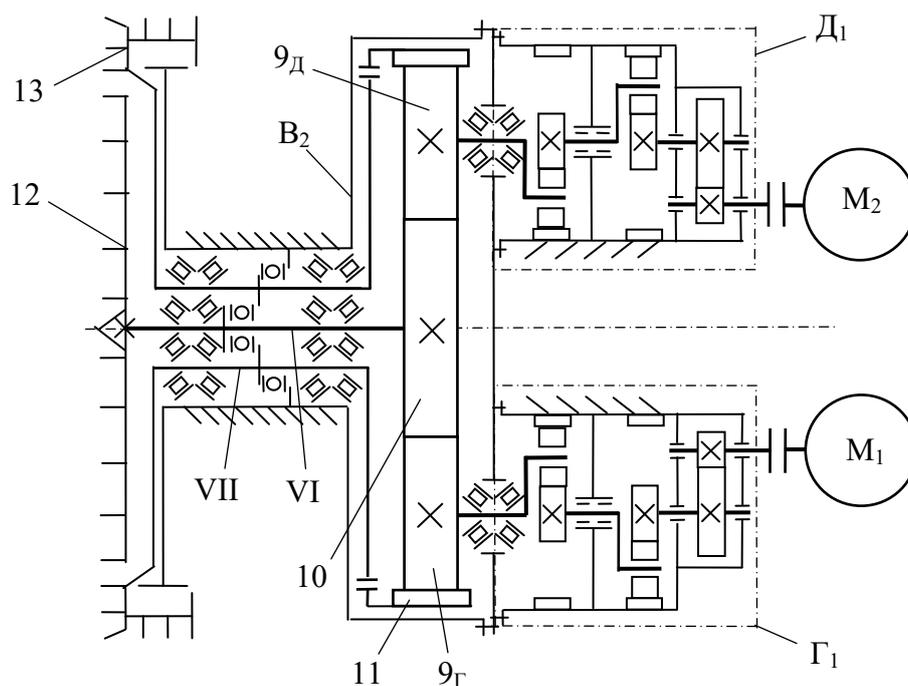
12 – центральный ротор; 13 – ковшовая рама

**Рисунок 1.** – Принципиальная кинематическая схема привода соосных роторов проходческих комбайнов типа ПК-8 и ПКС-8

В приводе (рисунок 2) соосных роторов проходческого комбайна нового поколения типа КРП-3 вместо спаренного, двухпоточного, цилиндрического, четырехступенчатого редуктора ( $A_1, B_1$ ) по предыдущей схеме (рисунок 1), разработаны и успешно используются два унифицированных между собой модуля ( $\Gamma_1, Д_1$ ), собранные в отдель-

ных корпусах, каждый из которых состоит из соединенных последовательно одной ступени цилиндрической передачи и двух ступеней планетарных передач, приводимые в действие от двух электродвигателей  $M_1, M_2$  по 132 кВт.

Передаточные отношения  $u_{ц.р}, u_{к.р}$  приводов центрального ротора 12 и ковшовой рамы 13, т.е. отношения угловых скоростей  $\omega_{M1}, \omega_{M2}$  роторов электродвигателей  $M_1, M_2$  к соответствующим угловым скоростям  $\omega_{ц.р}, \omega_{к.р}$  вращений центрального ротора 12 и ковшовой рамы 13, в комбайнах ПК-8, ПКС-8 и КРП-3 равны:  $u_{ц.р} = 114$ ,  $u_{к.р} = 215$ .



**Рисунок 2. – Принципиальная кинематическая схема привода соосных роторов проходческого комбайна типа КРП-3**

Исполнительные органы в сборе с электромеханическими приводами проходческих комбайнов типа ПК-8, ПКС-8 и КРП-3 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.

Динамические модели трансмиссии исполнительных органов этих комбайнов формировалась на основе сборочных чертежей на данный привод. Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов ПК-8, ПКС-8 и КРП-3 представлены на рисунках 3 и 4.

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 ( $J_{M1}, J_{M2}, J_{11}-J_{19}, J_{21}-J_{25}$ ), способные накапливать кинетическую энергию;

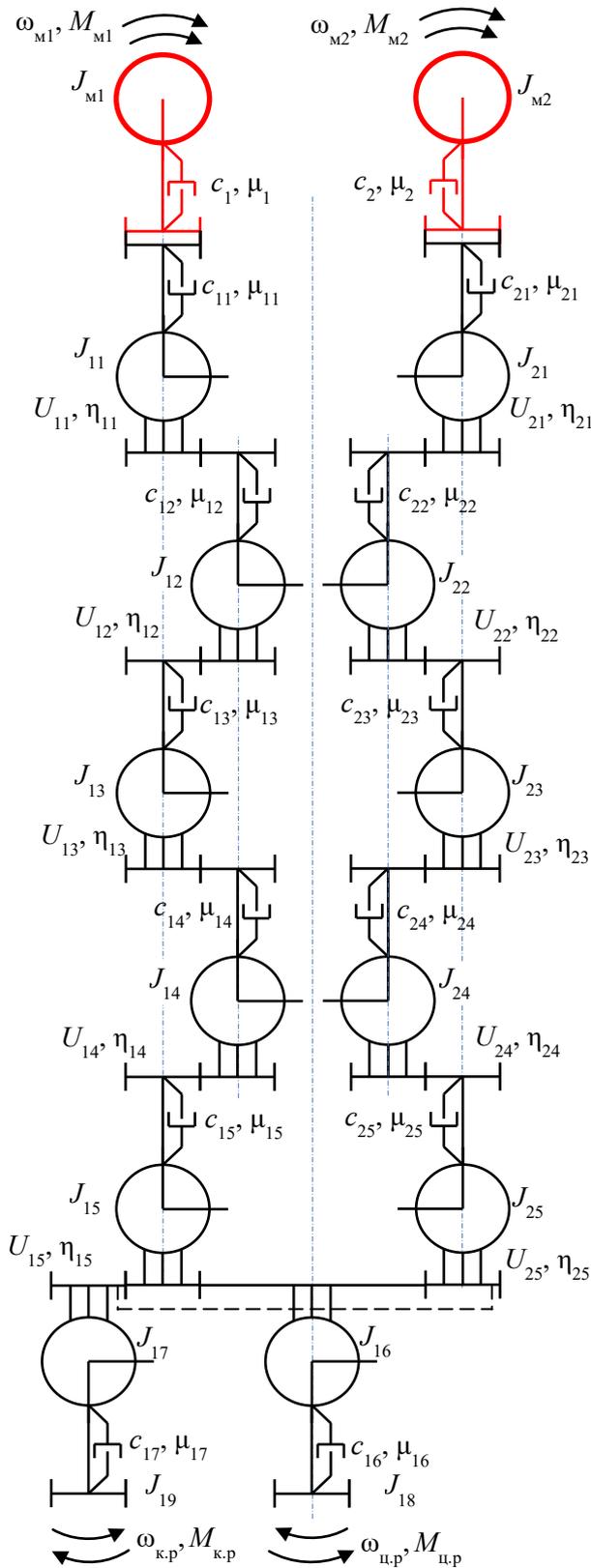


Рисунок 3. – Динамическая модель привода соосных роторов проходческих комбайнов типа ПК-8М и ПКС-8

- упругие элементы ( $c_1, c_2, c_{11}-c_{17}, c_{21}-c_{25}$ ), обладающие способностью накапливать потенциальную энергию;
- трансформаторные элементы ( $U_{11}, \eta_{11} - U_{15}, \eta_{15}; U_{21}, \eta_{21} - U_{25}, \eta_{25}$ ), отображающие безынерционные преобразования параметров потока энергии, реализуемые техническими устройствами, называемыми трансформаторами;
- диссипативные элементы ( $\mu_1, \mu_2, \mu_{11}-\mu_{17}, \mu_{21}-\mu_{25}$ ), обладающие свойствами рассеивания энергии.

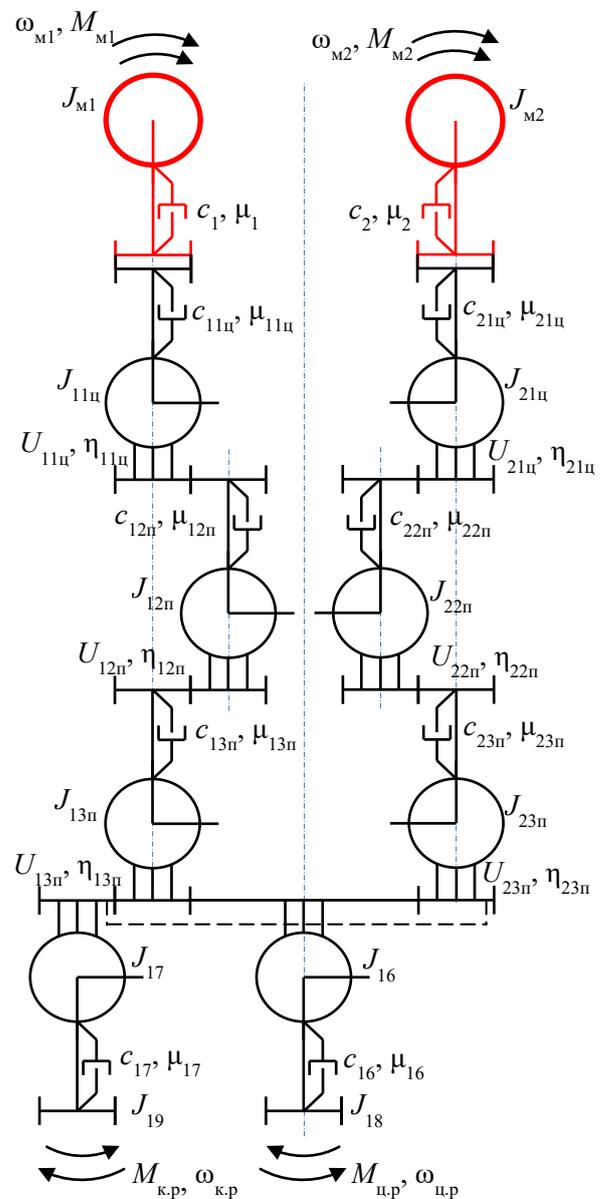


Рисунок 4. – Динамическая модель привода соосных роторов проходческого комбайна типа КРП-3

На динамическую систему исполнительного органа действуют внешние воздействия типа потенциала:  $M_{M1}$ ,  $M_{M2}$ ,  $M_{P1}$ ,  $M_{P2}$  – внешние воздействия, соответствующие моментам двигателей  $M_1$ ,  $M_2$  и соосных роторов 12, 13.

На основании динамических моделей структурно-матричным методом, подробно описанном в [5], в настоящее время формируются математические модели в виде систем компонентных и топологических уравнений.

**Заключение.** Динамические модели приводов соосных роторов проходческих комбайнов типа ПКС-8 и КРП-3, сформированные на основе абстрактных инерционных, упругих, диссипативных и трансформаторных элементов, наделенных определенными физическими свойствами, а также внешних воздействий типа потенциала, соответствующих активным моментам двигателей и реактивным нагрузкам на соосных роторах, позволяют с помощью компонентных и топологических уравнений проводить комплексный анализ нагрузок в элементах как используемых приводов, так и при проектных расчетах их перспективных вариантов.

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

### Информация об авторе

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

### Information about the author

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

Поступила в редакцию 06.05.2021 г.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УДК 669.14.018.847(045)

**Францкевич В.С.<sup>1</sup>, Новик Д.М.**<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ  
СТАЛИ 1.4462 В НАСЫЩЕННЫХ СОЛЕВЫХ РАСТВОРАХ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования коррозионной стойкости в насыщенных солевых растворах хлорида калия и натрия нержавеющей стали 1.4462, являющейся основным конструкционным материалом шнековых растворителей. Для определения коррозионной устойчивости стали применялись весовой и электрохимические методы. Определен состав алюминиевого сплава, используемого в качестве протекторной защиты стали от коррозии. Были получены катодные и анодные поляризационные кривые и определена скорость коррозии стали в насыщенном солевом растворе при разных температурах как в присутствии протекторной защиты, так и без нее. Представлены результаты электрохимических исследований на потенциостате/гальваностате скорости коррозии стали. Доказана высокая эффективность протекторной защиты растворителя от коррозии.

**Ключевые слова:** сталь нержавеющая, коррозия, раствор солевой, температура, протекторная защита, микроскопия электронная, исследования электрохимические.

**Frantskevich V.S.<sup>1</sup>, Novik D.M.**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus**STUDY OF CORROSION RESISTANCE OF STAINLESS  
STEEL 1.4462 IN SATURATED SALT SOLUTIONS**

**Abstract.** The article presents the results of a study of corrosion resistance in saturated salt solutions of potassium and sodium chlorides of stainless steel 1.4462, which is the main structural material of screw solvents. To determine the corrosion resistance of steel, gravimetric and electrochemical methods were used. The composition of the aluminum alloy used as a protector protection of steel against corrosion has been determined. Cathodic and anodic polarization curves were obtained and the corrosion rate of steel in a saturated saline solution was determined at different temperatures, both in the presence of protective protection and without it. The results of electrochemical studies on a potentiostat/galvanostat of the corrosion rate of steel are presented. Proven high efficiency of solvent protection against corrosion.

**Keywords:** stainless steel, corrosion, saline solution, temperature, tread protection, electronic microscopy, electrochemical research.

**Введение.** Одной из причин снижения надежности и долговечности технологического оборудования является коррозия металла, из которого они изготовлены.

Коррозия – это самопроизвольное разрушение металлов и сплавов в результате химического, электрохимического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой.

Для нержавеющей сталей чаще всего характерна питтинговая и межкристаллитная коррозия [1-4].

Межкристаллитная коррозия зачастую наблюдается в сплавах с большим содержанием хрома. Данная коррозия обуславливается тем, что насыщенные фазы растворяются по избирательному принципу. В ситуациях, когда в фазах есть легирующие добавки (в нашем случае молибден), процесс растворения ускоряется.

Основные факторы межкристаллитной коррозии следующие:

- высокая температура среды и период выдержки металла в ней;
- наличие в сплаве легирующих добавок, которые склонны к перепассивации;
- агрессивность эксплуатационной среды.

Часто встречающейся разновидностью межкристаллитной коррозии является ножевая коррозия. Она отмечается на сварных соединениях. Ножевое разрушение считается локальным, оно протекает между швом и основным металлом. В большинстве случаев такому разрушению подвергаются сварные соединения: сплавов с высоким содержанием молибдена; хромоникелевых высокоуглеродистых сталей и др. При сварке таких сплавов происходит взаимодействие холодного и нагретого до 1300 °С металла. Карбиды хрома при этом растворяются в расплаве. Когда последний охлаждается, новых карбидов не образуется, в твердой фазе остается углерод, наблюдается выпадение карбидов хрома (в очень больших количествах). Если атмосфера, в которой происходят подобные процессы, является агрессивной, на узком участке сварного соединения на межкристаллитном уровне отмечается (постепенное) растворение элементов, входящих в сплав.

Ножевая коррозия с большой скоростью распространяется вглубь металла и существенным образом зависит от технологии сварки. Особенно интенсивно она протекает в элементах оборудования, подвергнутых пластической деформации: эллиптических и сферических днищах, отводах, коленах, сварных соединениях и т.д. Межкристаллитная коррозия опасна тем, что при наличии остаточных сварочных напряжений и термических циклов пуска-останова происходит ее перерастание в коррозионное растрескивание под напряжением. В некоторых высокопрочных и нержавеющих сталях можно наблюдать существенное изменение структуры металла в зоне термического влияния на расстоянии примерно 10-15 мм от сварного шва.

Причину межкристаллитной коррозии аустенитных нержавеющих сталей связывают с образованием зернограничных выделений карбидов, обогащенных хромом. При традиционной обработке стали на твердый раствор в ней после закалки содержится в пересыщенном твердом растворе значительное количество углерода и азота. В результате последующего термического воздействия при 450-700 °С на границе зерен образуются обогащенные хромом выделения  $M_23C_6$ . Эти карбиды образуются из-за диффузии углерода из общего объема зерна, а хрома – только с приграничных областей. В этих условиях участки зерен, примыкающие к зернограничным выделениям, оказываются обедненными хромом и в определенных водных растворах склонны к растворению. Межкристаллитная коррозия в основном распространяется вглубь металла по границам зерен и почти незаметна с поверхности.

Основным конструкционным материалом при изготовлении элементов шнекового растворителя, используемого при производстве хлористого калия галургическим способом, является дуплексная нержавеющая сталь 1.4462. Обозначения в разных странах и химический состав стали 1.4462 представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. – Обозначения стали 1.4462 в разных странах

США	Япония	DIN	ЕС
S31803	SUS329J3L	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462

Таблица 2. – Состав стали 1.4462

Элементы	C	Cr	Ni	Mo	N
Содержание, %	< 0,03	21-23	4,5-6,5	2,5-3,5	0,12-0,22

Использование дуплексных нержавеющей сталей, особенно 1.4462, набирает популярность благодаря их уникальной комбинации отличной коррозионной стойкости, стойкости к коррозионному растрескиванию под напряжением и высокой прочности на разрыв и пределу текучести. Относительно более низкое содержание никеля по сравнению с обычными аустенитными марками также делает сталь 1.4462 предпочтительной альтернативой с экономической точки зрения. Она обладает хорошей коррозионной стойкостью в хлоридных и кислотных средах, особенно в фосфорных и органических кислотах. Коррозионная стойкость выше, чем у стали 1.4404. В результате дуплексной структуры сталь 1.4462 менее подвержена межкристаллитной коррозии, устойчива к коррозионному растрескиванию под напряжением и устойчива к точечной коррозии. Это объясняет ее широкое использование в химической промышленности [5].

**Методология.** Для определения коррозионной устойчивости нержавеющей стали 1.4462 в насыщенных солевых растворах хлоридов калия и натрия, которые являются агрессивными коррозионными средами, применялись весовой и электрохимические методы.

Перед проведением всех коррозионных испытаний образцы предварительно подготавливали: вначале обезжиривали при температуре 60-80 °С в течение 10-20 минут, а затем активировали. Для обезжиривания использовали раствор следующего состава: NaOH – 5-10 г/л; Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 20-40 г/л; Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – 20-40 г/л. Активирование производилось в растворе серной кислоты с концентрацией 30 г/л при температуре 18-25 °С в течение 1 минуты.

Наиболее простым и доступным методом определения коррозионной стойкости металлов в электролитах является испытание образца стали при постоянном погружении. Испытания проводили при частичном погружении в неподвижную коррозионную среду. При этом проводили измерение электродных потенциалов с помощью рН-метра рН-150 и электрода сравнения, в качестве которого использовали хлорсеребряный. На электроде, погруженном в раствор насыщенного хлоридом калия, устанавливается следующее равновесие:



При измерении потенциала в качестве измерительного электрода использовался редоксметрический, а в качестве вспомогательного – хлорсеребряный. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности при определении окислительно-восстановительного потенциала для преобразователя ±3 мВ.

В качестве коррозионных сред использовали насыщенные солевые растворы хлоридов калия и натрия при температурах 20 и 100 °С.

Перед проведением испытаний образцы после предварительной подготовки взвешивали, определяли площадь с помощью штангенциркуля. Исследования проводили в течение 24 часов, после чего образцы извлекали, промывали, при этом уточняли площадь погружения образца в раствор. Снятие продуктов коррозии проводили в концентрированных азотной (для нержавеющей стали) и серной (для углеродистой стали) кислотах, при комнатной температуре в течение 30-40 секунд. После этого образцы промывали, сушили и взвешивали. По изменению массы рассчитывали массовый показатель коррозии  $K_m$ , г/(м<sup>2</sup>·ч):

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot t} = i_k \cdot q,$$

где  $\Delta m$  – изменение массы исследуемого образца, г;

$S$  – площадь образца,  $m^2$ ;

$t$  – время выдержки образца в исследуемом растворе, ч;

$i_k$  – плотность тока коррозии,  $A/m^2$ ;

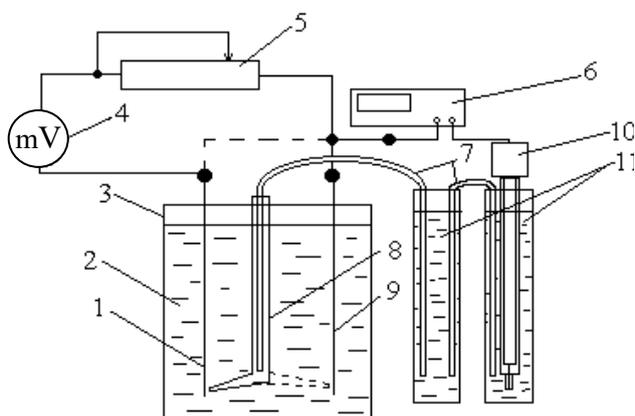
$q$  – электрохимический эквивалент,  $г/(А \cdot ч)$ .

Для снятия поляризационных кривых использовали потенциометрический метод. Автоматическое поддержание заданных значений потенциала постоянными в течение длительного времени осуществляли с помощью потенциостата. Потенциостат ПИ-50-1 предназначен для исследования быстротекущих электрохимических процессов на границе электрод-электролит потенциостатическим, потенциодинамическим, импульсным методами.

Задающее напряжение должно подаваться на вход потенциостата от внешнего задатчика напряжений, например, от программатора ПР-8. Предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности установки потенциала рабочего электрода  $\pm(1 \pm 0,001|U|)$  мВ, где  $U$  – напряжение, подаваемое на вход потенциостата, мВ. Предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности регулирования потенциала рабочего электрода  $\pm 0,5$  мВ; дрейф нуля потенциала рабочего электрода за первый час (после прогрева)  $\pm 1$  мВ, за все остальное время  $\pm 0,5$  мВ.

Для измерения силы тока при снятии поляризационных кривых использовался вольтметр универсальный цифровой В7-35. Диапазон измеряемой величины  $10^{-7}$ -10 А. Предел допускаемой относительной основной погрешности  $\pm(0,4 + 0,1(|X_k/X| - 1))$ , где  $X$  – показания вольтметра;  $X_k$  – значения номинального предела измерения. Значения электродных потенциалов пересчитаны в шкалу нормального водородного электрода (НВЭ).

Метод снятия коррозионных диаграмм (диаграмм Эванса) наиболее близок к потенциостатическому методу, но он намного проще в аппаратном исполнении (рисунок 1).



1 – графитовые электроды; 2 – исследуемая коррозионная среда; 3 – стеклянный стакан;

4 – милливольтметр В7-35; 5 – магазин сопротивлений Р33; 6 – рН-метр рН-150;

7 – солевой мост; 8 – капилляр;

9 – электрод-образец; 10 – хлор-серебряный электрод сравнения;

11 – раствор насыщенного хлорида калия

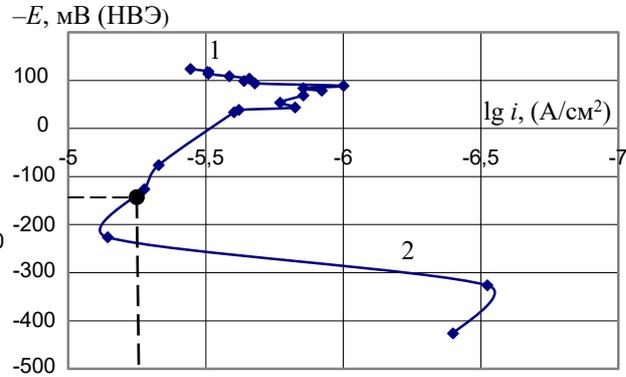
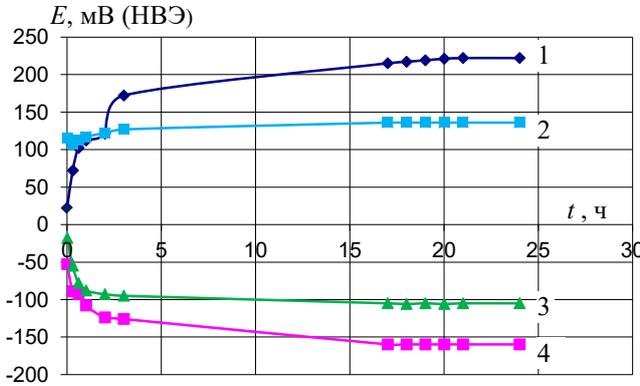
Рисунок 1. – Схема снятия диаграмм Эванса

Равновесный потенциал устанавливался в течение 5 минут. При снятии поляризационных кривых смещение потенциала производили через 2 мВ, в катодную и анодную стороны (время выдержки каждого потенциала 3 минуты), а при снятии диаграмм Эванса производили смещение токов через 0,1 мА, при этом одновременно фиксировали катодные и анодные потенциалы.

Для получения наиболее точных результатов все эксперименты повторяли не менее трех раз, также проверяли сходимость результатов, полученных разными методами исследования.

**Результаты исследований коррозионной стойкости стали.** Проведенные исследования показали высокую коррозионную стойкость стали 1.4462 в солевых растворах. Так, на рисунках 2-4 и таблицах 3, 4 представлено поведение нержавеющей стали в коррозионной сре-

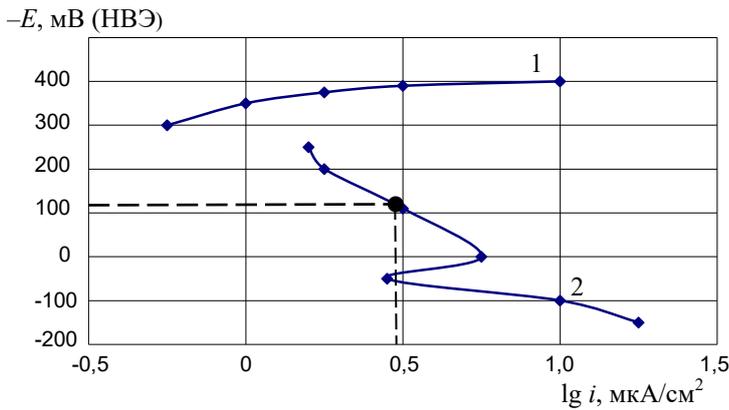
де. Из них следует, что с течением времени потенциалы сдвигаются в электроположительную сторону. Это позволяет утверждать об образовании пассивной пленки на поверхности исследуемого образца. Потенциалы образца близки к потенциалам растворения железа, что вероятно связано с протеканием коррозионных процессов в активном состоянии.



1, 2 – нержавеющая и углеродистая стали, соответственно, в насыщенном солевом растворе при 20 °С;  
3, 4 – нержавеющая и углеродистая стали, соответственно, в насыщенном солевом растворе при 100 °С  
Рисунок 2. – Изменение стационарного потенциала во времени и результаты весового метода

1 – катодная поляризационная кривая;  
2 – анодная поляризационная кривая ( $i_k = 5,6 \text{ мкА/см}^2$ )

Рисунок 3. – Поляризационные кривые стали в насыщенном солевом растворе при 100 °С



1 – катодная поляризационная кривая;  
2 – анодная поляризационная кривая ( $i_k = 3,05 \text{ мкА/см}^2$ )

Рисунок 4. – Поляризационные кривые стали в насыщенном солевом растворе при 20 °С

Для исследуемой нержавеющей стали были сняты катодные и анодные поляризационные кривые в насыщенных солевых растворах. В холодном растворе сталь в области потенциалов +50 ÷ (-200) мВ находится в пассивном состоянии. При этом величина тока полной пассивации имеет пределы 2 ÷ 5 мкА/см<sup>2</sup>.

Для определения тока коррозии в исследуемых растворах на анодные поляризационные кривые наносили значение стационарного потенциала, определенного в течение 24 ч. Точка пересечения находится в пассивной области и соответствует

току коррозии, равному 5,6 мкА/см<sup>2</sup>, который отвечает глубинному показателю коррозии 0,034 мм/год. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462

Температура насыщенного солевого раствора, °С	Метод снятия поляризационных кривых		Весовой метод	
	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Балл стойкости	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Балл стойкости
100	0,034	4	0,032	4
20	0,00012	1	0,00011	1

Таблица 4. – Скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462

Марка стали	Температура насыщенного солевого раствора, °С	Скорость коррозии, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Балл стойкости
1.4462	100	$3,4 \cdot 10^{-2}$	0,034	4
	20	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,00012	1

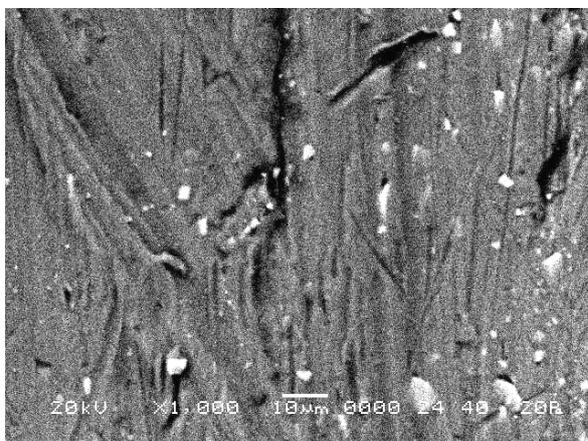
**Результаты исследований протекторной защиты растворителя.** Протекторная защита представляет собой использование специального материала – активного металла с повышенными электроотрицательными свойствами.

Под воздействием воздуха протектор растворяется, в результате чего основной металл сохраняется, несмотря на воздействие коррозионных факторов. Протекторная защита – одна из разновидностей катодного электрохимического метода. Наименее активный металл в период взаимодействия привлекает к собственным ионам электроны более активного металла. Таким образом, в одно и то же время осуществляется сразу два процесса:

- восстановительные процессы в металле с меньшей активностью (на катоде);
- окислительные процессы металла анода с минимальной активностью, за счет чего и обеспечивается защита трубопровода (или другой стальной конструкции) от коррозии.

Спустя некоторое время эффективность протектора падает (в связи с потерей контакта с защищаемым металлом или же из-за растворения защищающего компонента). По этой причине возникает потребность в замене протектора.

На предприятии, эксплуатирующем шнековые растворители, в качестве материала протектора используются алюминиевые сплавы (рисунок 5).



**Рисунок 5. – Микрофотография алюминиевого сплава (увеличение в 1000 раз)**

Элементный состав представленного алюминиевого сплава определяли с помощью электронного сканирующего микроскопа JEOL JSM-5610LV. Анализ химического состава протекторного сплава представлен на рисунке 6 и в таблице 5.

В ходе экспериментальных исследований была получена скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462 в присутствии протекторной защиты (таблица 6), и построены поляризационные коррозионные диаграммы при температурах исследуемого раствора 20 °С и 80 °С, которые представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

Таблица 5. – Распределение элементов алюминиевого сплава

Элемент	Энергия, кэВ	Содержание, мас. %	Погрешность, %	Содержание, ат. %
Al	1,486	94,79	0,03	97,71
Fe	6,398	1,01	0,13	0,50
Zn	8,630	4,20	0,31	1,79
Всего		100,00		100,00

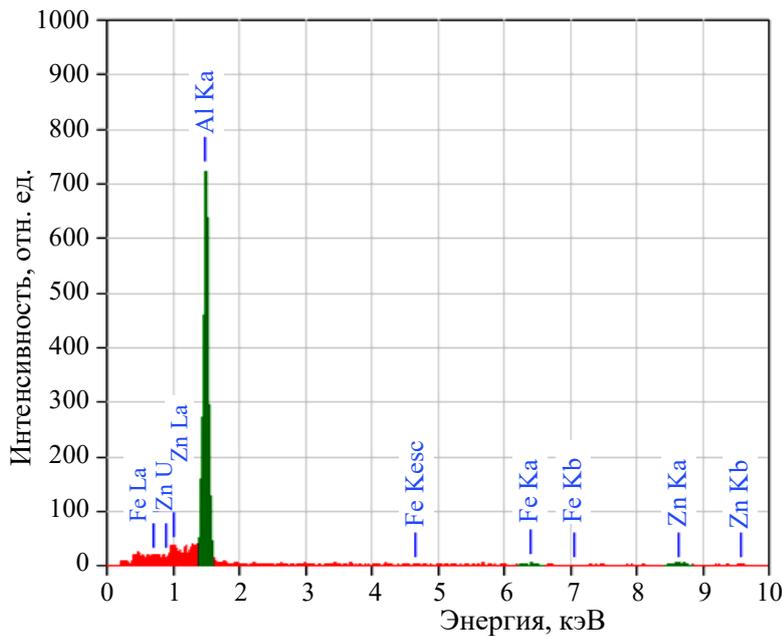


Рисунок 6. – Диаграмма распределения элементов алюминиевого сплава

Из коррозионной диаграммы, представленной на рисунке 7 следует, что для короткозамкнутой системы графит/сталь анодный ток растворения стали и восстановления одинаковы и равны  $i_0 = 5 \text{ мкА/см}^2$ , а поверхность стали изопотенциальна, чему отвечает стационарный потенциал равный  $-122 \text{ мВ}$ .

При контакте с протектором катодный процесс полностью переносится на него. В таком случае анодный ток системы увеличился до  $45 \text{ мкА/см}^2$ , а ток катодного процесса на защищаемой стали протектором уменьшился практически до 0.

Таблица 6. – Скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462 в присутствии протекторной защиты в виде алюминиевого сплава

Марка стали	Температура насыщенного солевого раствора, °C	Скорость коррозии, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{час})$	Глубинный показатель коррозии, мм/год	Балл стойкости
1.4462	80	$3,4 \cdot 10^{-5}$	0,000034	1
	20	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,0000012	1

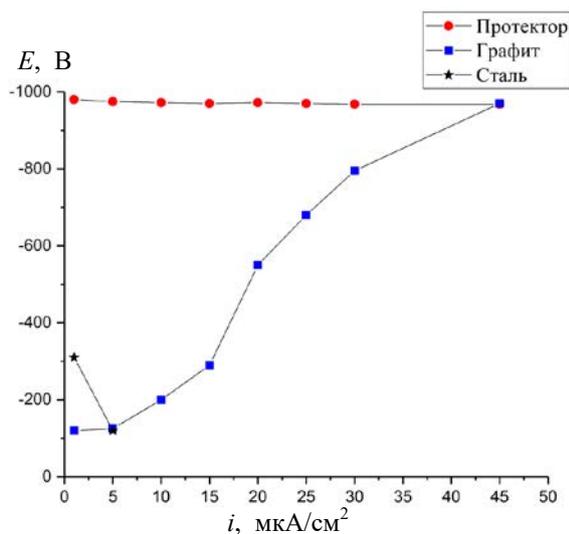


Рисунок 7. – Поляризационные коррозионные диаграммы при температуре исследуемого раствора 20 °C

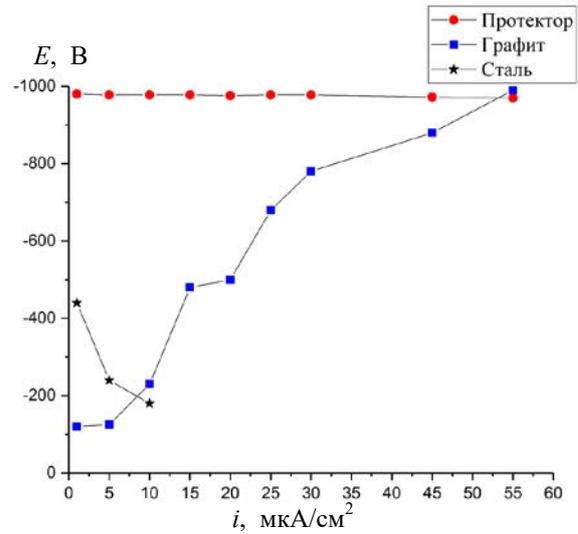


Рисунок 8. – Поляризационные коррозионные диаграммы при температуре исследуемого раствора 80 °C

На рисунке 8 показано, что повышение температуры коррозионной среды способствует увеличению тока коррозии стали до  $8 \text{ мкА/см}^2$ , что может быть вызвано активацией анодного процесса. Как при комнатной температуре, при контакте с протектором катодный процесс так же полностью переносится на него и полностью защищает сталь от коррозионного процесса.

Электрохимические исследования проводились в трехэлектродной ячейке на потенциостате/гальваностате Autolab PGNST 302N относительно равновесного потенциала в интервале приложенной поляризации  $\pm 200 \text{ мВ}$  и скоростью развертки  $2 \text{ мВ/с}$ . Анализ результатов и расчет параметров процесса коррозии проводили с использованием программного обеспечения «Nova 2.1.4» (таблицы 7, 8).

Таблица 7. – Скорость коррозии алюминия

Тип образца	Потенциал коррозии измеренный, В	Плотность тока коррозии, А/см <sup>2</sup>	Ток коррозии, А	Скорость коррозии, мм/год	Поляризационное сопротивление, Ом	Потенциал коррозии рассчитанный, В
Алюм., насыщ. 25 °С	-1,0193	8,46E-08	3,38E-07	0,000918	16494	-0,99759
Алюм., насыщ. 50 °С	-1,0113	2,25E-06	8,98E-06	0,024363	661,9	-1,0129
Алюм., насыщ. 80 °С	-1,0477	2,55E-07	1,02E-06	0,002767	3359,4	-1,0426

Таблица 8. – Скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462

Тип образца	Потенциал коррозии измеренный, В	Плотность тока коррозии, А/см <sup>2</sup>	Ток коррозии, А	Скорость коррозии, мм/год	Поляризационное сопротивление, Ом	Потенциал коррозии рассчитанный, В
Сталь нерж., насыщ. 25 °С	-0,16285	1,34E-08	5,35E-08	0,000155	363700	-0,16636
Сталь нерж., насыщ. 50 °С	-0,28232	2,31E-07	9,26E-07	0,002689	15509	-0,28003
Сталь нерж., насыщ. 80 °С	-0,28296	5,69E-07	2,27E-06	0,006607	8143,6	-0,2829

**Заключение.** Исследована коррозионная стойкость конструкционных материалов шнекового растворителя и возможность использования протекторной защиты. Были получены катодные и анодные поляризационные кривые в насыщенных солевых растворах нержавеющей стали, используемой при изготовлении элементов растворителя. Изучена скорость коррозии нержавеющей стали 1.4462, определены глубинный показатель коррозии, балл стойкости материала в насыщенных солевых растворах при температурах 20 °С и 100 °С. Определено влияние алюминиевой протекторной защиты на показатели коррозионной стойкости нержавеющей стали в насыщенных солевых растворах при температурах 20 °С и 80 °С.

Исходя из полученных данных, видно, что увеличение температуры коррозионной среды приводит к сдвигу электродного потенциала в сторону более электроотрицательных значений, что говорит об увеличении активности металла.

В среднем значения скоростей коррозии подтверждают эту зависимость, однако в насыщенных растворах результаты интерпретации поляризационных кривых имеют

значительную погрешность, обусловленную кристаллизацией солей и адсорбцией компонентов на поверхности.

Эффективность протекторной защиты является очень высокой. При том, что затраты на ее реализацию небольшие, необходимо применять алюминиевую протекторную защиту растворителя. Применение магниевых сплавов в качестве материала протектора также будет эффективным, однако переход ионов магния в раствор отрицательно скажется на технологическом процессе производства хлористого калия. Образующийся при этом хлорид магния является высаливателем по отношению к хлоридам калия и натрия, что в свою очередь приведет к загрязнению конечного продукта – хлористого калия – хлоридом натрия на стадии кристаллизации.

#### Список использованных источников

1. Effect of surface oxide properties on corrosion resistance of 316L stainless steel for biomedical applications / C.C. Shih [et al.] // *Corrosion Science*. – 2004. – Т. 46, № 2. – С. 427-441.

2. Aydoğdu, G.H. Determination of susceptibility to intergranular corrosion and electrochemical reactivation behaviour of AISI 316L type stainless steel / G.H. Aydoğdu, M.K. Aydinol // *Corrosion Science*. – 2006. – Т. 48, № 11. – С. 3565-3583.

3. Inappropriate cleaning treatments of stainless steel AISI 316L caused a corrosion failure of a liquid transporter truck / V. Romanovski [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. – 2020. – Vol. 117. – P. 1-9.

4. Определение источника и механизма образования коррозии емкостного оборудования для перевозки жидких сред / В.С. Францкевич [и др.] // *Труды БГТУ. Химические технологии, биотехнология, геоэкология. Сер. 2*. – 2020. – № 1 (229). – С. 27-33.

5. Провести исследования и выполнить подбор новых коррозионностойких (высоколегированных) сталей и неметаллических материалов для работы в различных агрессивных средах СОФ 4 РУ ОАО «Беларуськалий»: отчет о НИР (заключ.) / Полоцкий государственный университет; рук. А.В. Митинов. – Новополоцк, 2014. – 79 с. – № ГР 20131894.

---

#### Информация об авторах

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

*Новик Дмитрий Михайлович* – кандидат технических наук, e-mail: dm\_novik75@mail.ru.

#### Information about the authors

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

*Novik Dmitry* – Ph. D. (Engineering), e-mail: dm\_novik75@mail.ru.

Поступила в редакцию 28.04.2021 г.

УДК 622.242.6-762:621.891(045)(476)

**Богданович П.Н.<sup>1</sup>, Станкевич В.М.<sup>2</sup>, Коднянко М.Ю.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь<sup>2</sup>Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси, г. Гомель, Беларусь<sup>3</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Беларусь

## ИЗНАШИВАНИЕ ПОЛИУРЕТАНА НЕЗАКРЕПЛЕННЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

**Аннотация.** Приводятся закономерности влияния нормальной нагрузки на интенсивность изнашивания полиуретанов различной твердости при трении по незакрепленным абразивным частицам. Показано, что линейная интенсивность изнашивания манжеты возрастает по мере увеличения нормальной нагрузки и снижения твердости полиуретана. С удалением от кромки манжеты к серединной части ее цилиндрической поверхности износ полиуретана уменьшается вследствие снижения вклада микрорезания. Зависимость линейной интенсивности изнашивания от исходного размера абразивных частиц графически изображается кривой с максимумом, что связано с глубиной внедрения частиц в изнашиваемый материал и вероятностью их проникновения в зазор между трущимися деталями.

**Ключевые слова:** абразивная частица, абразивное изнашивание, износостойкость, линейная интенсивность изнашивания, манжета, микрорезание, нагрузка, полиуретан, твердость, усталостное изнашивание, эластомер.

**Bogdanovich P.N.<sup>1</sup>, Stankevich V.M.<sup>2</sup>, Kadnianka M.Yu.<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus<sup>2</sup>Gomel Branch of the State Educational Establishment "University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus", Gomel, Belarus<sup>3</sup>JSC "Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production", Soligorsk, Belarus

## POLYURETHANE WEAR BY UNFIXED ABRASIVE PARTICLES

**Abstract.** Regularities of the influence of normal load on the wear rate of polyurethanes of different hardness during friction against loose abrasive particles are given. It has been shown that the linear wear rate of the cuffs increases with an increase in the normal load and a decrease in the hardness of the polyurethane. With the distance from the lip of the cuff to the middle part of its cylindrical surface, the wear of polyurethane decreases due to a decrease in the contribution of microcutting. The dependence of the linear wear rate on the initial size of abrasive particles is graphically depicted by a curve with a maximum, which is associated with the depth of penetration of particles into the wear material and the probability of their penetration into the gap between the rubbing parts.

**Keywords:** abrasive particle, abrasive wear, wear resistance, linear wear rate, cuff, microcutting, load, polyurethane, hardness, fatigue wear, elastomer.

**Введение.** В узлах трения горных машин в качестве износостойких материалов широко применяются полиуретаны, обладающие высокой абразивной стойкостью, жесткостью и сопротивлением усталостному разрушению [1]. Введение в их состав твердых смазочных материалов не приводит к значительному снижению механических характеристик получаемых композитов, однако позволяет эффективно управлять их триботехническими свойствами. Это обеспечивает возможность значительно повысить долговечность деталей буровых и грунтовых насосов, эксплуатирующихся в жидкой

абразивосодержащей среде [2-4]. К настоящему времени достаточно полно изучены закономерности изнашивания полиуретанов при трении по закрепленному абразиву, и в меньшей степени рассмотрены особенности изнашивания полиуретанов в водной и углекислотной среде, содержащих абразивные частицы [3-5]. Жидкая среда в данном случае играет роль смазочного материала, что вносит существенные изменения в процесс трения эластомера по абразиву, а, следовательно, и в процесс его деградации. Следует отметить, что ряд деталей горного оборудования работает при отсутствии жидкости в зоне фрикционного контакта: режим «пуск – стоп» буровых и грунтовых насосов, сопряжения «лента – приводной барабан», «лента – скребок» конвейера и др. Поэтому представляет интерес выявить механизмы и закономерности изнашивания полиуретана при трении по незакрепленным абразивным частицам в условиях отсутствия жидкости, разделяющей сопрягаемые элементы.

**Методика проведения испытаний.** Образцы для исследования (манжеты) были изготовлены из полиуретана (ПУ) различных марок: ПУ-68, ПУ-78, ПУ-88. Твердость  $H_{Sh}$  по Шору их соответствовала 68 ShA; 78 ShA и 88 ShA. Образцы выполнялись в виде кольца наружным диаметром 40 мм с центральным отверстием  $\varnothing$  20 мм и толщиной 10 мм. Это кольцо помещалось между двумя шайбами из стали 45 наружным диаметром 30 мм и внутренним – 20 мм и закреплялось в нагружающем механизме. В качестве контртела была выбрана плита из стали 18ХГТ, в которой был выполнен паз в виде полуцилиндра  $\varnothing$  40 мм. Паз контртела цементирован на глубину 2 мм и закален до 55...62 HRC. Шероховатость полуцилиндрической поверхности трения соответствовала  $R_a = 0,8$  мкм. С торцов паз закрывался заглушками, что позволяло исключить удаление абразивных частиц с его поверхности в процессе трения.

Плита, установленная на ползуне машины трения, совершала возвратно-поступательное движение относительно неподвижного образца из ПУ. При этом осуществлялось трение наружной цилиндрической поверхности полиуретанового кольца по внутренней поверхности стального полуцилиндра, содержащего абразивные частицы. В качестве абразива использовали оксид кремния. Площадь контакта сопрягаемых деталей составляла  $A_a = 6,28 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

Линейную интенсивность  $I_h$  изнашивания ПУ рассчитывали по формуле:

$$I_h = \frac{\Delta m}{\rho A_a L},$$

где  $\Delta m$  – потеря массы, кг;

$\rho$  – плотность изнашиваемого материала (1180 кг/м<sup>3</sup>);

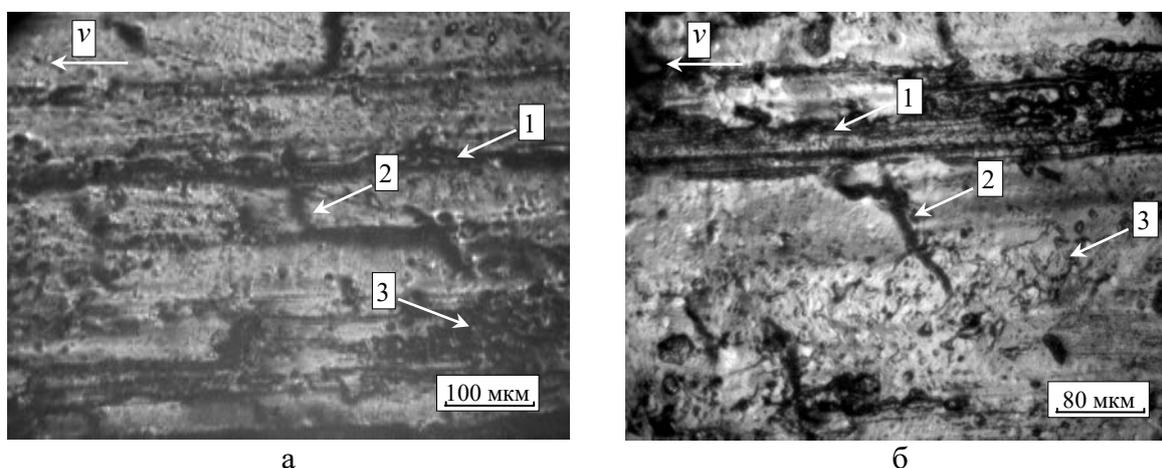
$L$  – путь трения.

Длительность испытаний составляла 4 часа при скорости скольжения  $v = 0,22$  м/с. Нормальная нагрузка  $N$ , прижимающая трущиеся детали друг другу, изменялась в интервале 5÷25 Н.

**Обсуждение результатов испытаний.** Анализ изношенных образцов из ПУ-68 показал, что износ ПУ распределяется неравномерно вдоль поверхности трения. В наибольшей степени изнашивается кромка, являющаяся границей перехода от плоской поверхности манжеты к цилиндрической. Прилегающая к кромке кольцевая часть плоской поверхности шириной 0,5-1,5 мм также подвергается изнашиванию, что косвенно свидетельствует о значительной деформации манжеты при скольжении по абразиву.

По мере удаления от кромки к серединной части цилиндрической поверхности износ ПУ снижается, что обусловлено уменьшением вероятности попадания абразивных частиц в эту область контакта манжеты с пазом. Подтверждением этому являются снимок изношенной поверхности манжеты, представленный на рисунке 1а. Видно, что

прилегающая к границе контактной площадки (кромке манжеты) область подвергалась преимущественно абразивному виду изнашивания. Об этом свидетельствуют параллельно расположенные бороздки (в направлении стрелки 1), ориентированные вдоль вектора скорости скольжения. Бороздки могут сильно различаться по поперечным размерам.



**Рисунок 1. – Изношенная поверхность трения манжеты из ПУ  
вблизи границы (а) и в серединной части (б) контактной площадки**

Имеют место также следы усталостного изнашивания ПУ, что подтверждается наличием усталостных микротрещин, расположенных преимущественно перпендикулярно вектору скорости скольжения (в направлении стрелки 2). Микротрещины могут быть результатом микроразрывов полимера под действием высоких растягивающих напряжений, возникающих в контакте с абразивной частицей, внедрившейся в контртело при приложении касательной нагрузки. В отдельных случаях возможно образование участков с бугристой поверхностью трения (область 3), косвенно свидетельствующих о разрушении ПУ посредством образования скаток, сопровождающихся впоследствии «вырывами» небольших объемов материала. Размер таких участков достигает нескольких десятков микрометров.

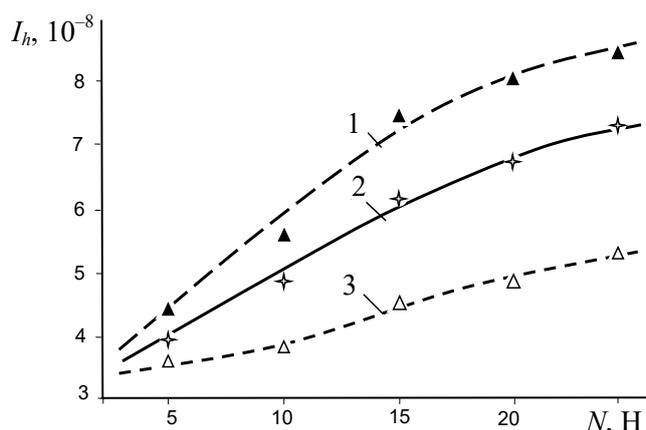
Анализ поверхностей изношенных манжет позволяет предполагать, что доминирующим видом изнашивания кромки и прилегающей к ней области является микрорезание – наиболее опасный вид абразивного изнашивания незакрепленными частицами. При этом усталостное разрушение вносит менее существенный вклад. Под термином «микрорезание» будем понимать процесс разрушения ПУ, сопровождающийся образованием на поверхности трения бороздок, ориентированных вдоль вектора скорости скольжения.

С приближением к серединной части поверхности трения манжеты вклад различных видов изнашивания в общий износ ПУ несколько изменяется (рисунок 1б). На изношенной поверхности присутствуют редко расположенные продольные бороздки – результат слабо проявляющегося абразивного микрорезания (стрелка 1). Поскольку по краям контакта ПУ с абразивной частицей и за контактной площадкой растягивающие напряжения достигают максимума, прилегающие к бороздке участки поверхности трения содержат усталостные микротрещины (в направлении стрелки 2). Аналогичные по размерам и ориентации микротрещины образуются вне абразивных бороздок – например, участок поверхности на рисунке 1а внизу слева. Большие по площади участки изношенной поверхности содержат хаотично расположенные, взаимно пересекающиеся микротрещины малых размеров. Возможно, их возникновение обусловлено многократ-

ным образованием и разрушением фрикционных связей между сопрягаемыми материалами, обладающих высоким сопротивлением сдвигу. Таким образом, по мере удаления от кромки манжеты доминирующим видом изнашивания становится усталостное разрушение поверхностного слоя.

Описанный характер изнашивания ПУ обусловлен, по-видимому, тем, что в срединную часть контактной площадки попадают в основном мелкодисперсные абразивные частицы, и их концентрация значительно меньше, чем в области, прилегающей к кромке манжеты.

Испытания показали, что линейная интенсивность изнашивания ПУ всех марок при трении по стали в присутствии абразивных частиц, монотонно возрастает с увеличением



1 – ПУ-68; 2 – ПУ-78; 3 – ПУ-88

Рисунок 2. – Зависимости линейной интенсивности изнашивания ПУ различной твердости от нагрузки при  $d_0 = 150$  мкм

нием нормальной нагрузки  $N$  (рисунок 2). Такая зависимость  $I_h(N)$  обусловлена одновременным влиянием двух конкурирующих факторов. Суть основного из них в том, что повышение нормальной нагрузки вызывает увеличение деформаций ПУ в зоне его фрикционного контакта с абразивной частицей и в прилегающей к этой зоне области [6, 7]. Это существенно ускоряет процесс разрушения многократно деформируемого слоя ПУ. Кроме того, чем выше  $N$ , тем более прочно закрепляется абразивная частица в поверхностном слое стального контртела, и в меньшей степени реализуется воз-

можность ее перекатывания по поверхности полиуретана под действием касательной нагрузки. В результате действия перечисленных причин увеличивается вклад микрорезания, что сопровождается монотонным ростом  $I_h$ .

Механизм действия второго фактора заключается в том, что с повышением нормальной нагрузки уменьшается возможность проникновения абразивных частиц в зазор между манжетой и контртелом, что особенно характерно для крупнодисперсных частиц. В результате этого в меньшей степени проявляется микрорезание и снижается интенсивность изнашивания ПУ в срединной области контактной площадки. На изнашивание области, непосредственно примыкающей к кромке манжеты, это оказывает менее заметное влияние. В целом влияние второго фактора на  $I_h$  манжеты проявляется в большей степени при высоких нагрузках, а его вклад в интенсивность изнашивания меньше, чем вклад первого фактора. Поэтому в интервале больших значений нормальной нагрузки зависимость  $I_h(N)$  становится менее существенной.

Сравнительный анализ кривых 1-3 изнашивания ПУ различных марок свидетельствует о том, что с повышением твердости ПУ его сопротивление изнашиванию возрастает (рисунок 2). Причем, переход от твердости 68 ShA к 78 ShA сопровождается менее значимым снижением линейной интенсивности изнашивания  $\Delta I_h$  ПУ, чем переход от 78 ShA к 88 ShA. Это различие  $\Delta I_h$  становится более ощутимым в области высоких нагрузок. Причина в том, что с увеличением твердости ПУ уменьшается вероятность проникновения абразивных частиц, особенно крупнодисперсных, в зону фрикционного контакта манжеты с втулкой и, как следствие, снижается интенсивность изнашивания. Уменьшается также глубина внедрения абразивных частиц и размеры образующихся при

трении бороздок. Кроме того, с повышением твердости материала манжеты ее сопротивление изнашиванию возрастает вследствие уменьшения деформаций ПУ в контакте с абразивной частицей и за пределами контактной площадки. В частности, уменьшаются наиболее опасные (с точки зрения усталостного разрушения эластомера) деформации растяжения за контактной площадкой, что снижает вероятность образования и скорость распространения микротрещин усталости.

Существенное влияние на сопротивление ПУ изнашиванию оказывает исходный размер  $d_0$  абразивных частиц (рисунок 3). В данном случае за  $d_0$  принимался средний размер частиц, измеренный до начала испытаний, так как в процессе трения наблюдалось их диспергирование. Так, увеличение исходного размера абразивных частиц с 70 мкм до 150 мкм сопровождается ростом линейной интенсивности изнашивания полиуретана ПУ-68 более чем в 1,4 раза. Основная причина такой зависимости  $I_h(d_0)$  в том, что частицы большего размера глубже внедряются в изнашиваемый материал. Последний при этом подвергается более высоким контактным деформациям. В итоге, увеличивается вклад усталостного и абразивного видов изнашивания ПУ.

При  $d_0 > 160$  мкм наблюдается обратная зависимость  $I_h(d_0)$ . По нашему мнению, основная причина снижения интенсивности изнашивания в том, что в области больших значений  $d_0$  доминирующим фактором становится вероятность проникновения абразивных частиц в зазор между манжетой и втулкой. Очевидно, что повышение нормальной нагрузки способствует сближению сопрягаемых деталей, и по этой причине уменьшается число абразивных частиц в контакте. Это приводит к снижению числа повреждений ПУ в средней части поверхности трения манжеты и величины  $I_h$ .

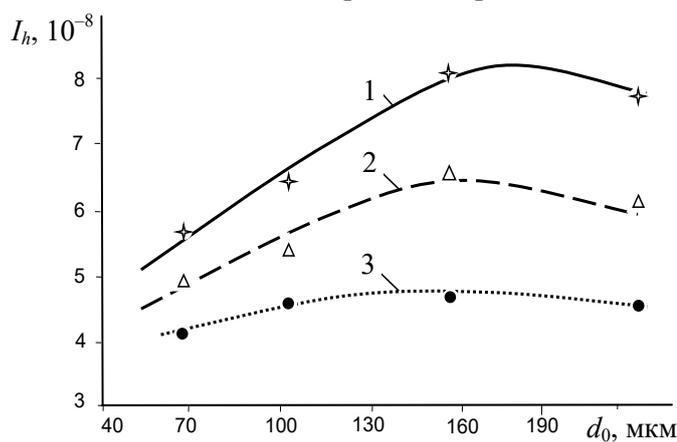
С повышением твердости изнашиваемого материала влияние начального размера абразивных частиц на  $I_h$  становится менее существенным (кривые 2 и 3 на рисунке 3). По-видимому, основной причиной такой зависимости  $I_h(H_{Sh})$  является то, что увеличение твердости ПУ способствует переходу от режима преимущественного проскальзывания частицы к ее перекатыванию – процессу, при котором интенсивность изнашивания эластомера слабо зависит от размера абразивных частиц.

#### Выводы.

1. Показано, что по мере удаления от кромки манжеты к серединной части ее цилиндрической поверхности износ полиуретана снижается. При этом наблюдается переход от микрорезания к преимущественно усталостному изнашиванию.

2. Линейная интенсивность изнашивания манжет незакрепленными абразивными частицами монотонно возрастает по мере увеличения нормальной нагрузки и снижения твердости полиуретана.

3. Зависимость линейной интенсивности изнашивания полиуретана от исходного размера абразивных частиц графически изображается кривой с максимумом, что связано с глубиной внедрения частиц в изнашиваемый материал и вероятностью их проникновения в зазор между трущимися деталями.



1 – ПУ-68; 2 – ПУ-78; 3 – ПУ-88

Рисунок 3. – Влияние исходного размера абразивных частиц на линейную интенсивность изнашивания полиуретана при  $N = 20$  Н

**Список использованных источников**

1. Зуев, Ю.С. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях / Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтярева. – М.: Химия, 1986. – 262 с.
2. Ильский, А.Л. Расчет и конструирование бурового оборудования: учеб. пособие для ВУЗов / А.Л. Ильский, Ю.В. Миронов, А.Г. Чернобыльский. – М.: Недра, 1985. – 452 с.
3. Износостойкость уплотнений буровых насосов из полиуретана, работающих в водной среде с абразивом / П.Н. Богданович [и др.] // Горная механика и машиностроение – 2020. – № 1. – С. 50-55.
4. Закономерности изнашивания уплотнений буровых насосов из полиуретана в углеводородной рабочей среде с абразивом / П.Н. Богданович [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 2. – С. 28-32.
5. Бродский, С.Г. Деградация гидравлических насосов и моторов при абразивном износе полидисперсным загрязнителем / С.Г. Бродский // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – С. 51-57.
6. Богданович, П.Н. Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
7. Bogdanowich, P.N. Polymer Fatigue / P.N. Bogdanowich, D.V. Tkachuk // Encyclopedia of Tribology. USA. – 2013. – P. 2578-2585.

**Информация об авторах**

*Богданович Павел Николаевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и оборудование», УО «Белорусский государственный университет транспорта» (ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель, Беларусь), e-mail: bogdanovich@bsut.by.

*Станкевич Виктор Михайлович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации деятельности подразделений Министерства по чрезвычайным ситуациям, Гомельский филиал Университета гражданской защиты МЧС Беларуси (пр. Речицкий, 35А, 246023, Беларусь, г. Гомель, Беларусь), e-mail: stankevich\_v@mail.ru.

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

**Information about the authors**

*Bogdanovich Pavel Nikolayevich* – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department “Transport and technological machines and equipment”, Belarusian State University of Transport (34, Kirova Str., 246653, Gomel, Belarus), e-mail: bogdanovich@bsut.by.

*Stankevich Victor Mikhaylovich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Chair of Organization of Activities in Units of the Ministry for Emergency Situations, Gomel Branch of the State Educational Establishment “University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus” (35A, Rechitskiy Ave., Gomel, Belarus), e-mail: stankevich\_v@mail.ru.

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

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

**РЫСПАНОВ НУРЛАН БЕКТАСОВИЧ**  
(к 60-летию со дня рождения)



28 июня 2021 года исполняется 60 лет Рыспанову Нурлану Бектасовичу – известному ученому и общественному деятелю Казахстана, одному из ведущих организаторов горной науки в этой стране, Президенту Национальной Академии Горных Наук Республики Казахстан, Президенту Евразийской Академии Горных Наук, Президенту горнопромышленного союза Казахстана, Почетному члену Национальной Академии Наук Республики Казахстан, доктору технических наук.

Н.Б. Рыспанов родился 28 июня 1961 г. в Павлодарской области. В 1991 г. защитил диссертацию кандидата технических наук в МГТУ им. Баумана в г. Москве. По окончании аспирантуры работал в Павлодарском индустриальном институте старшим преподавателем, старшим научным сотрудником. В 1993 г. был назначен директором научно-инженерного центра при Инженерной Академии Республики Казахстан в г. Павлодаре.

Начиная с 1997 г., Н.Б. Рыспанов работал на ответственных государственных должностях. В 1997 г. был назначен начальником Павлодарского областного Департамента индустрии, транспорта и коммуникаций. Курировал работу, в том числе и горно-металлургического комплекса региона. В эти годы были введены в эксплуатацию после длительного простоя золотоизвлекательная фабрика (ЗИФ) «Майкаинзолото», ЗИФ «Торткудук». В 1999 г. Н.Б. Рыспанов был назначен директором Департамента промышленности Министерства энергетики, индустрии и торговли Казахстана, а в 2000 г. – директором Департамента тяжелой промышленности Министерства минеральных ресурсов. В эти годы Н.Б. Рыспанов курировал работу всего горно-металлургического комплекса страны. Под его руководством была разработана успешная программа развития горно-металлургических отраслей промышленности.

В 2001 г. Н.Б. Рыспанов был назначен генеральным директором горно-металлургической компании «Тау-Кен» на свинцово-цинковом месторождении «Шалкия» Кызылординской области. В течение 2002-2003 гг. была проведена восстановительная работа на затопленном, простаивавшем более 10 лет руднике. Н.Б. Рыспановым совместно с институтом «Казмеханобр» и ВНИИЦВЕТМЕТ была проведена опытно-промышленная работа по подземному выщелачиванию цинка из бедных сульфидных руд месторождения «Шалкия». Была доказана возможность выщелачивания цинка из сульфидных руд, получен сплав цинка с чистотой 99,987 марки ЦОА.

В период 2003-2005 гг. Н.Б. Рыспанов работает в системе урановой промышленности Казахстана, где возглавляет урановую горнорудную компанию. В течение 2-х лет с основания была создана полноценная уранодобывающая компания. В 2009 г. был назначен на должность вице-президента АО «НАК «Казатомпром» по вопросам науки и

производства. В эти годы Н.Б. Рыспанов продолжает работать над проблемой подземного выщелачивания металлов, экспериментируя непосредственно над подземным скважинным выщелачиванием урана. Результатом научных исследований явилась защита диссертации доктора технических наук в 2010 г. Тема диссертационной работы «Теоретические основы кучного выщелачивания металлов». Н.Б. Рыспановым был открыт закон кучного выщелачивания металлов.

Н.Б. Рыспанов стоял у истоков создания Национальной Академии Горных Наук Республики Казахстан (НАГН) – национального координатора фундаментальных и прикладных исследований в области горнодобывающих и перерабатывающих технологий. На посту Президента НАГН он вносит неоценимый вклад в развитие приоритетных, актуальных для промышленности Казахстана направлений горной науки, в развитие соответствующей научной инфраструктуры.

Своей научно-организационной деятельностью Н.Б. Рыспанов активно способствует формированию благоприятных условий создания и развития научно-инновационного потенциала технологической модернизации горнодобывающего комплекса Казахстана, оказывает содействие государственным органам управления и организациям отраслевой науки, осуществляющим регулирование жизнедеятельности и функционирование отрасли, в создании условий творческого взаимодействия науки и производства в этой сфере, содействие горным ученым в интеграции с научным сообществом на республиканском и международном уровне, оказывает им помощь в продвижении результатов научной деятельности.

Н.Б. Рыспанов активный популяризатор достижений отечественной горной науки, решительно противодействующий недооценке важности развития собственного научно-инновационного потенциала. При его непосредственном участии развиваются многие актуальные научные направления в области добычи полезных ископаемых физико-химическими методами, а также технологий гидродобычи.

Н.Б. Рыспанов вносит большой вклад в выход отечественной горной науки на мировой уровень. При его активном участии организована Евразийская Академия Горных Наук (ЕАГН) – независимая, самоуправляемая, профессиональная, научная, творческая общественная организация, объединяющая ведущих ученых и специалистов стран-учредителей Академии в области горного дела, геологии, разработки техники и технологии добычи и переработки твердых, жидких и газообразных полезных ископаемых, проектирования, строительства и эксплуатации горнодобывающих предприятий, горной экологии, горного права, экономики и управления. Учитывая высокий авторитет в научном сообществе и неоценимый научно-организационный вклад в становление ЕАГН, Н.Б. Рыспанов избран ее Президентом. Под его руководством успешно реализуются основные направления работы ЕАГН – содействие развитию горнопромышленного комплекса стран-учредителей Академии; содействие в формировании эффективной системы регулирования развития отрасли в странах Евразийского региона; содействие в формировании научно-инновационного потенциала технологической модернизации горнодобывающей отрасли; выявление приоритетных направлений научных исследований, перспективных проектных и опытно-конструкторских разработок; содействие совершенствованию процесса подготовки и переподготовки высших научных кадров и специалистов для отраслей горно-промышленного комплекса стран-учредителей Академии.

*Редакционная коллегия журнала «Горная механика и машиностроение» поздравляет Рыспанова Нурлана Бектасовича с наступающим 60-летием. Желает здоровья, неиссякаемой энергии, успехов во всех начинаниях.*

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

---

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков, включая пробелы, (не менее 5-6 страниц).
4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 4), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников (не более 20). Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписанную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. Необходимо представить на отдельной странице следующие сведения на русском и английском языках для каждого автора: фамилия, имя, отчество (полностью), ученую степень, звание, должность и место работы, адрес и e-mail организации, почтовый адрес для переписки, номера телефонов, ID ORCID.

1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14000 typographical units, including spaces, (at least 5-6 pages).
4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 4), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references (maximum 20). The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, psx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
7. Formulae should be created in the “Math Type” editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
10. It is necessary to submit on a separate page the following information in Russian and English for each author: name, surname, patronymic (in full), academic degree, title, position, place of work, address and e-mail of the organization, postal address for correspondence, phone numbers, ID ORCID.



Подписные 749332  
индексы: 74933

**Основные направления научно-исследовательской деятельности  
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:**

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

**Адрес редакции:**

ул. Козлова, 69  
223710, г. Солигорск,  
Республика Беларусь

**Контактные данные:**

главный редактор (+375 174) 26 28 37  
редакция (+375 174) 33 01 07  
e-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)  
<http://www.sipr.by>

ISSN 1728-3841



9 771728 384000