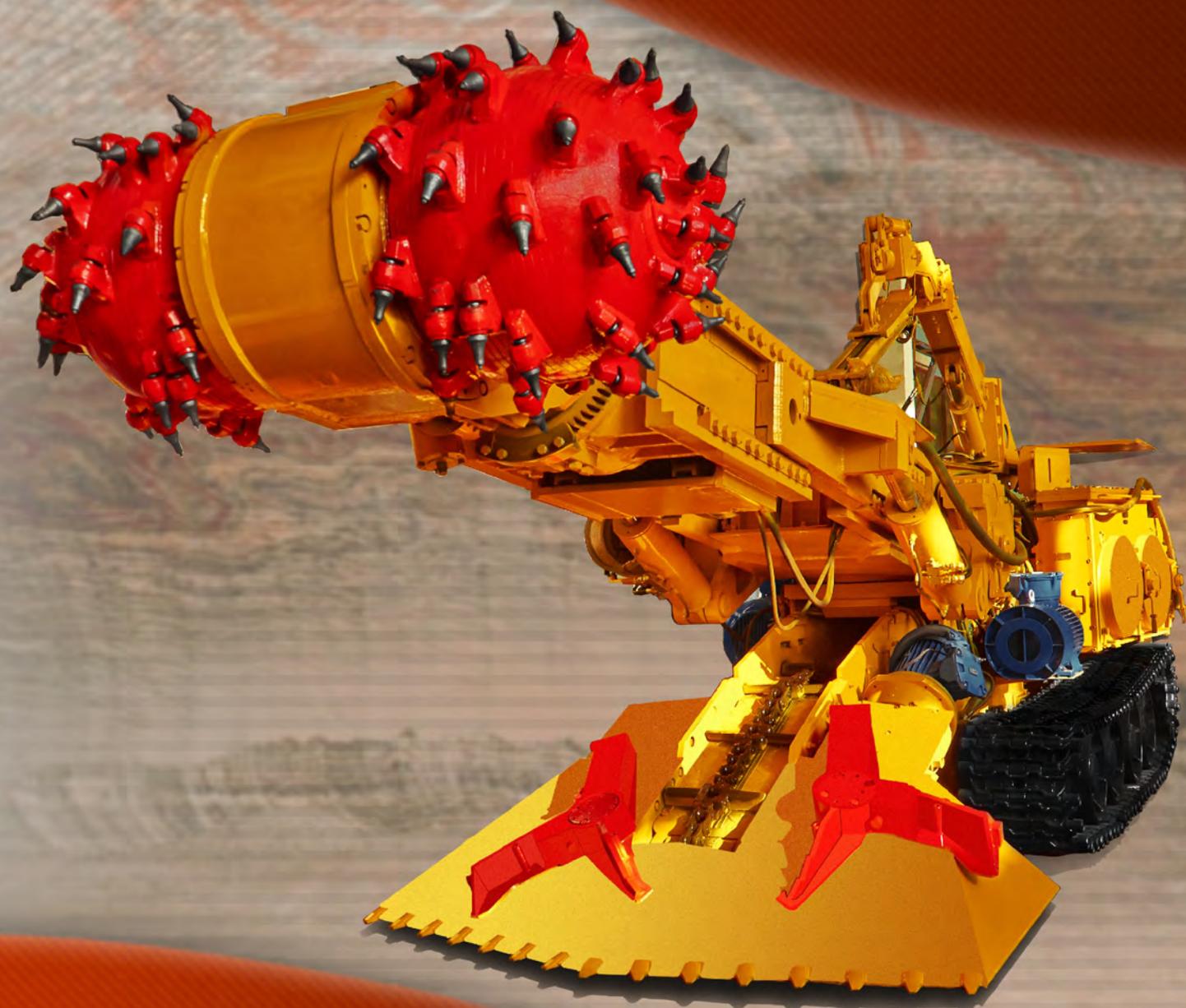


ISSN 1728-3841

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2015 №3



2015 № 3

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

## № 3 2015

### 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

**Щерба Владимир Яковлевич**

Заместитель главного редактора

**Прушак Виктор Яковлевич**

Технический редактор

**Барановский Анатолий Леонидович**

Ответственный секретарь

**Заяц Ирина Михайловна**

### Редакционная коллегия:

Андрейко С.С. — доктор технических наук, проф.

Богданович П.Н. — доктор технических наук, проф.

Данилов В.А. — доктор технических наук, проф.

Журавков М.А. — доктор физ.-мат. наук, проф.

Зубов В.П. — доктор технических наук, проф.

Кислов Н.В. — доктор технических наук, проф.

Петровский Б.И. — доктор технических наук

Березовский Н.И. — доктор технических наук, проф.

Басинюк В.Л. — доктор технических наук

Бровка Г.П. — доктор технических наук, доцент

Губанов В.А. — доктор технических наук

Захаров Ю.Н. — доктор технических наук, проф.

Иванов В.П. — доктор технических наук, проф.

Оника С.Г. — доктор технических наук, проф.

Струк В.А. — доктор технических наук, проф.

### Адрес редакции:

Республика Беларусь

223710, г. Солигорск, ул. Козлова, 69

Тел.: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07

факс: (+375 174) 26 28 37

E-mail: [ontipr@tut.by](mailto:ontipr@tut.by)



Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

---

---

### **ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

- Поляков А.Л., Мозговенко М.С., Ерохин К.А.** Устойчивость технологических сбоек при пересечении ими под углом 30-35° панельных выработок, пройденных в 1980-1990 годах на горизонте –620 м рудника 3 РУ ..... 5
- Зольников Н.А., Климович В.В., Титова Н.В., Дешковский В.Н.** Воздействие рассолов на соляные породы ..... 11
- Березовский Н.И., Борисейко В.В.** Повышение конкурентоспособности торфяных брикетов через усовершенствованные аспирационные системы в их технологии производства ..... 18
- Хлебко А.А., Шутин С.Г., Бакунович А.В., Морев А.Б., Петровский А.Б., Барбиков Д.В.** Селективная выемка пластов полезного ископаемого с породными прослоями, совершенствование технологии и оборудования ..... 28
- Чижик О.А., Морзак Г.И.** Обеспечение экологической безопасности при проведении текущего и капитального ремонта скважин на нефть ..... 35

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- Макаревич С.Д.** Разработка конструкции и методики определения коэффициента полезного действия ручного подъемно-тягового механизма ..... 44
- Прушак В.Я., Волчек О.М.** Надежность проходческих комбайнов для отработки калийных месторождений ..... 50
- Павлечко В.Н., Казаченко Г.В.** Влияние лопастей на давление осевого нагнетателя ... 56

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

- Барановский К.Э., Урбанович Н.И., Басалай И.А., Розенберг Е.В., Ильюшенко В.М., Дувалов П.Ю.** Испытания на износостойкость хромистых чугунов в литом состоянии ..... 63
- Овчинников Е.В., Авдейчик С.В., Антонов А.С., Мишук Ю.В.** Механизмы формирования ингибиторов изнашивания из фторсодержащих компонентов ..... 68
- Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Ситкевич Ф.А.** Высокотемпературные трансформации в слоистых силикатах ..... 81
- Эйсымонт Е.И., Григорьева Т.Ф., Бурцев А.Н., Овчинников Е.В., Авдейчик С.В.** Энергетические аспекты технологии композиционных термопластичных материалов для металлополимерных конструкций ..... 89

---

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.  
Подписные индексы: 74933 (для индивидуальных подписчиков), 749332 (для организаций)

---

Подписано в печать 20.08.2015 г.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>. Заказ . Усл. печ. л. 17,51. Тираж 120 экз.  
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»  
223610, Республика Беларусь, Минская область, г. Слуцк, ул. М. Богдановича, 7.  
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

# MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

## № 3 2015

### Founder of the Journal:

JSC «Soligorsk Institute for Problems  
of Resources Savings with Pilot  
Production»

### Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998

Issued four times a year

### Edition:

Editor-in-Chief

**Shcherba Vladimir Yakovlevich**

Editor-in-Chief Deputy

**Prushak Viktor Yakovlevich**

Technical Editor

**Baranovsky Anatoly Leonidovich**

Executive Secretary

**Zayats Irina Mikhailovna**

### Editorial Board:

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor

Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor

Danilov V.A. – Ph.D., Professor

Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor

Zubov V.P. – Ph.D., Professor

Kislov N.V. – Ph.D., Professor

Petrovsky B.I. – Ph.D.

Berezovsky N.I. – Ph.D., Professor

Basinyak V.L. – Ph.D.

Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor

Gubanov V.A. – Ph.D.

Zakharov Yu.N. – Ph.D., Professor

Ivanov V.P. – Ph.D., Professor

Onika S.G. – Ph.D., Professor

Struck V.A. – Ph.D., Professor

### Editorial Address:

The Republic of Belarus

223710, Soligorsk, Kozlova Street, 69

Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07

Fax: (+375 174) 26 28 37

E-mail: [ontipr@tut.by](mailto:ontipr@tut.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 science, machine-building)

© JSC «Soligorsk Institute for Problems of Resources Savings with Pilot Production», 2015

---

---

## CONTENTS

---

---

### *GEOTECHNOLOGY*

<b>Polyakov A.L., Mozgovenko M.S., Yerokhin K.A.</b> The stability of technological crosscuts while crossing by them the panel workings at the angle of 30-35° driven in 1980-1990 on the horizon –620 m of the mine № 3 .....	5
<b>Zolnikov N.A., Klimovich V.V., Tsitova N.V., Deshkovsky V.N.</b> Brines' influence on salt rocks .....	11
<b>Berezovsky N.I., Borisejko V.V.</b> The increase of compatibility of peats by using the advanced aspirating systems in their production technology .....	18
<b>Khlebko A.A., Shutin S.G., Bakunovich A.V., Morev A.B., Petrovsky A.B., Barbikov D.V.</b> Selective mining of mineral seams with intermediate rocks. Improvement of technology and equipment .....	28
<b>Chizhik O.A., Morzak G.I.</b> Environmental safety ensuring during the current repair and workover of oil wells .....	35

### *MACHINE-BUILDING*

<b>Makarevich S.D.</b> Development of the construction and the efficiency determination methods of the manual lifting and traction mechanisms .....	44
<b>Prushak V.Ya., Volchek O.M.</b> Safety of road heading machines for mining of potash deposits .....	50
<b>Pavlechko V.N., Kazachenko G.V.</b> Effect of blades on pressure produced by an axial blower .....	56

### *MATERIALS ENGINEERING*

<b>Baranovsky K.E., Urbanovich N.I., Basalai I.A., Rozenberg Ye.V., Ilyushenko V.M., Duvalov P.Yu.</b> Wear resistance test of chromic cast irons in the cast condition .....	63
<b>Auchynnikau Ya.V., Audzeichyk S.V., Antonov A.S., Mishuk Yu.V.</b> Mechanisms of formation of wear inhibitors from fluoropolymer components .....	68
<b>Liopo V.A., Auchynnikau Ya.V., Sitkevich F.A.</b> Transformation in high temperature silicate .....	81
<b>Eisymont Ye.I., Grigorjeva T.F., Burtsev A.N., Auchynnikau Ya.V., Audzeichyk S.V.</b> Energy aspects of the technology of composite thermoplastic materials for metal-polymer constructions .....	89

---

---

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

УДК 622.363.2.063.2:624.19(047)(476)

**УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СБОЕК ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ  
ИМИ ПОД УГЛОМ 30-35° ПАНЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК,  
ПРОЙДЕННЫХ В 1980-1990 ГОДАХ НА ГОРИЗОНТЕ –620 м РУДНИКА 3 РУ**

Поляков А.Л., Мозговенко М.С., Ерохин К.А. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

*В статье приводятся результаты исследований устойчивости технологических сбоек, которые пересекают пройденные 20-30 лет назад панельные выработки и предназначены для оценки возможности проведения, поддержания, а в дальнейшем и использования выработок в технологических процессах выемки подработанного IV сивьвинитового слоя после его обнажения.*

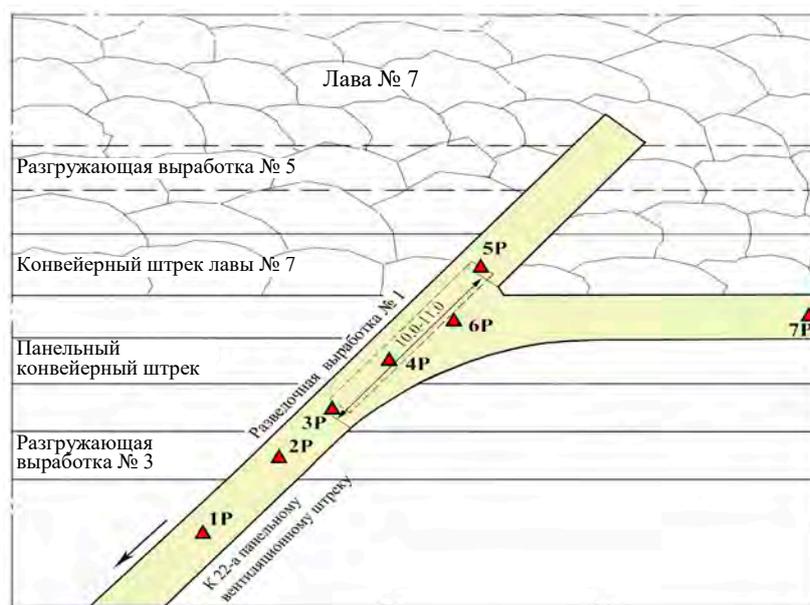
**Введение**

В процессе подготовки опытной лавы № 8-в-3 [1, 2] к очистной выемке полезного ископаемого необходима проходка определенного количества выработок, которые в свою очередь должны быть связаны между собой для обеспечения нормального режима проветривания, а так же для наличия запасного выхода. При подготовке лавы для выемки оставленного и подработанного IV сивьвинитового слоя стал вопрос о возможности проведения технологических сбоек. Рассматривались два варианта: первый – проведение сбоек полевыми, ниже I сивьвинитового слоя; второй – проведение сбоек, пересекая старые панельные выработки под некоторым углом. Оба этих варианта испытаны при подготовке 22а западной панели горизонта –620 м рудника 3 РУ. Первый вариант сразу показал существенный недостаток – для проведения полевой выработки необходимо наличие закладочных выработок для размещения в них пустой породы. Поэтому было принято решение о проходе сбойки, пересекая старые выработки под углом 30-35°. Из-за отсутствия опыта проходки таких выработок на месторождении было принято решение пройти первую выработку с помощью комбайна 4ПП-2С, который при необходимости мог выполнить оборку деформированных пород по ее контуру.

**Исследование характера деформирования разведочной выработки № 1,  
пройденной комбайном избирательного действия 4ПП-2С**

Район проведения разведочной выработки № 1 на 22а западной панели горизонта –620 м и места установки замерных станций приведены на рисунке 1. Привязка кровли разведочной выработки по мере ее отхода от 22а панельного вентиляционного штрека была переменной от оставления в кровле 0,25 м III сивьвинитового слоя до 0,4-0,5 м подработанного IV сивьвинитового слоя. При этом разведочная выработка частично была пройдена в целике между выработанными пространствами лав № 6 и № 7, частично по панельным выработкам 22 западной панели и пересекала (рисунок 1) разгружающую выработку № 3, панельный конвейерный штрек, конвейерный штрек лавы № 7, разгружающую выработку № 5, и на участке длиной 1,5-3,0 м выходила в вырабо-

танное пространство над лавой № 7. Из-за разрушения междуходовых целиков между панельными выработками вышележащие и неразрушенные слои каменной соли III-IV и IV сильвинитового слоя, а также III сильвинитовый слой (при подходе к разгружающей выработке № 3 на расстояние 3,0 м) опустились относительно аналогичных слоев в «массиве» на 0,4-1,2 м. При этом характер опускания названных слоев был аналогичным ранее описанному в работе [3] по результатам обследования скважин, пробуренных в кровле сбойки № 1.



▲ 1Р – номера станций и их расположение

**Рисунок 1 – Схема установки станций в разведочной выработке № 1 горизонта –620 м рудника 3 РУ**

Линейные параметры разведочной выработки в районе пересечения старых панельных выработок составляли:

- длина (считая от 22а панельного вентиляционного штрека) – 44 м;
- ширина – 3,5-3,7 м;
- высота – 3,3-3,6 м.

Визуальными наблюдениями, выполненными в момент проведения выработки, а также после ее проведения и отгона комбайна, было установлено следующее:

- все старые панельные выработки заполнены обрушенными породами, хаотично расположенными в сечении выработки и весьма уплотненными. Случаев высыпания этих пород в разведочную выработку № 1 в течение всего срока наблюдений обнаружено не было;

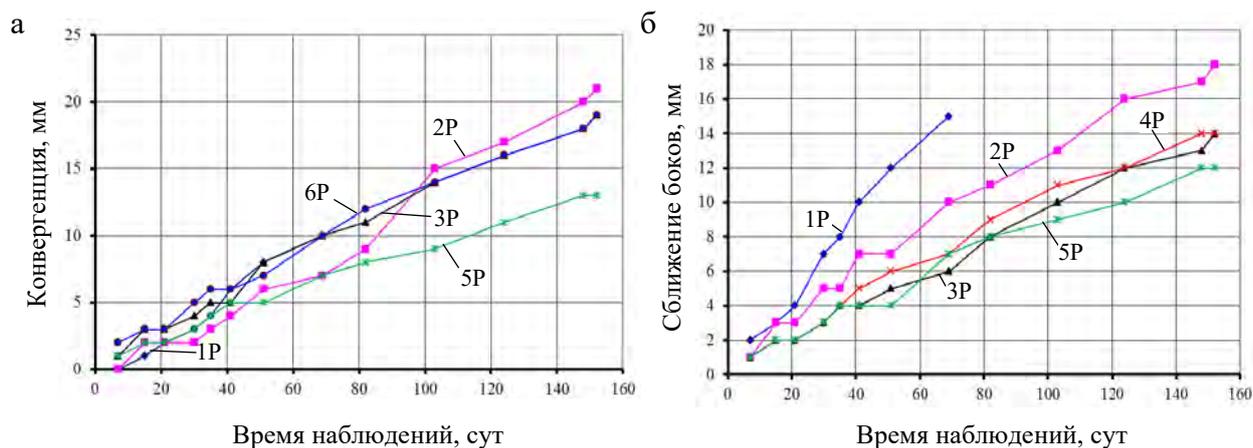
- ширина всех выработок уменьшилась до 1,5-2,0 м, а их высота уменьшилась на 1,0-1,2 м;

- междуходовые целики раздавлены, а слой каменной соли II-III и II, III сильвинитовые слои частично «смяты» и выдавлены в соседние выработки;

- межслоевая каменная соль III-IV и IV сильвинитовый слой над панельными выработками являются монолитными без видимых трещин и расслоений.

Кроме визуальных наблюдений, сразу после отгона комбайна из разведочной выработки, были организованы и инструментальные наблюдения за характером деформирования ее контура по станциям, которые устанавливались в кровле, почве и боках

на расстоянии 3-4 м друг от друга и располагались на участках, где ранее были панельные выработки и междуходовые целики, а станция 1Р (рисунок 1) располагалась в «массиве» на расстоянии 3,0 м от разгружающей выработки № 3. На рисунке 2 приведены сводные данные о характере деформирования контура разведочной выработки на всех станциях, за исключением результатов измерений конвергенции на станции 4Р. На данном участке выработки практически сразу после проведения появился прогиб, а затем трещина и расслоение по глинистому контакту, поэтому замеры конвергенции не выполнялись. Прогнозный срок службы разведочной выработки приведен в таблице 1.



**Рисунок 2 – Сводные данные о конвергенции (а) и схождении боков (б) разведочной выработки № 1 22а западной панели горизонта –620 м рудника 3 РУ**

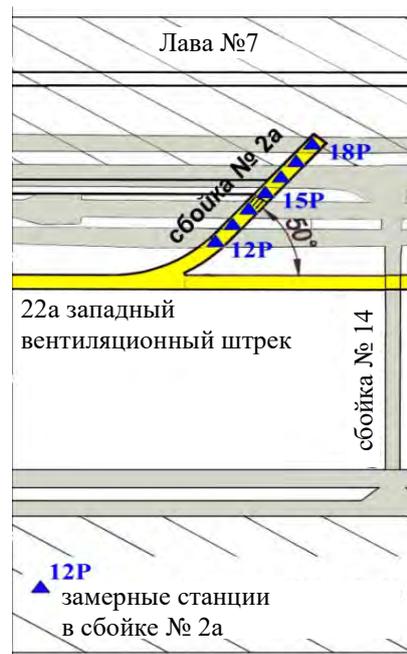
**Таблица 1 – Прогнозный срок службы разведочной выработки № 1 22а западной панели горизонта –620 м рудника 3 РУ**

Номер станции	Конвергенция, мм	Время наблюдений, сут	Стабилизированная скорость, мм/сут	Предельно допустимые значения конвергенции (без мер охраны), мм	Срок службы, сут (лет)
2Р	21,0	152,0	0,14	110,0	785 (2,15)
3Р	19,0	152,0	0,13	110,0	846 (2,31)
5Р	13,0	152,0	0,09	110,0	1222 (3,35)

Успешное завершение исследований в результате использования для проходки выработок (технологических сбоек) по ранее пройденным панельным выработкам комбайна 4ПП-2С позволило перейти ко второму этапу испытаний – оценке возможности проведения аналогичных выработок в аналогичных горнотехнических условиях комбайном ПКС-8.

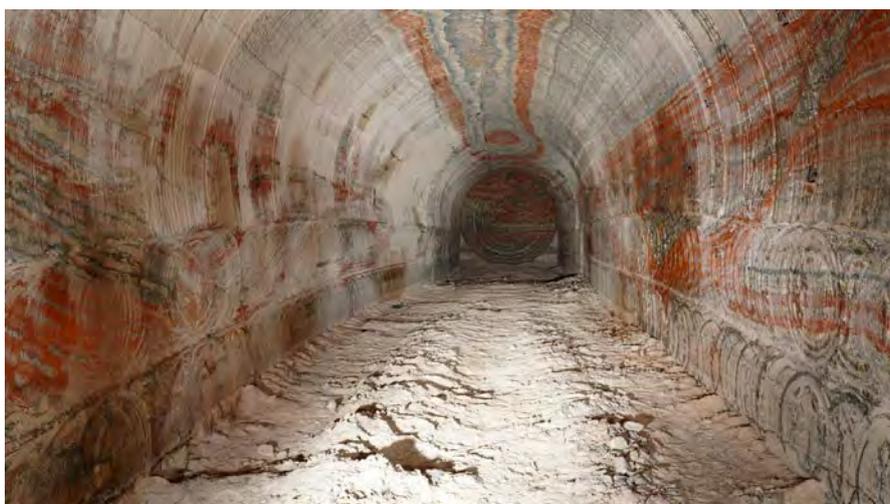
### **Исследование характера деформирования технологической сбойки № 2а, пройденной комбайном ПКС-8**

Горнотехнические условия проведения технологической сбойки № 2а (рисунок 3) остались такими же, как и в разведочной выработке № 1. Сохранились без изменения привязка кровли относительно пласта, угол проведения сбойки относительно панельных выработок.



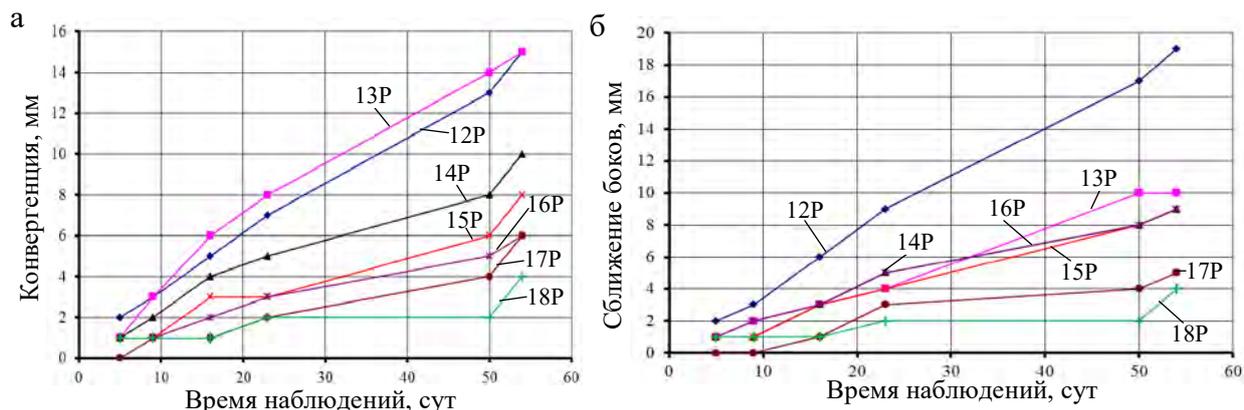
**Рисунок 3 – Схема установки станций в сбойке № 2а горизонта –620 м рудника 3 РУ**

Различия заключались в том, что сбойка была пройдена на всем протяжении шириной и высотой равными 3,0 м, а также в том, что она пройдена на участке между сбойками № 13 и № 14 22 западной панели, в отличие от разведочной выработки № 1, которая пройдена между сбойками № 4 и № 5. Кроме того, срок службы панельных выработок в районе сбойки № 2а примерно на 7-8 месяцев больше, чем в районе разведочной выработки № 1. Методика проведения визуальных и инструментальных наблюдений за характером деформирования контура технологической сбойки осталась без изменений. В сбойке было установлено 7 станций (профилей) по замеру конвергенции «кровля-почва» выработки и сближения ее боков. Внешний вид технологической сбойки после ее проведения приведен на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Общий вид и состояние сбойки № 2а через 180 суток после проведения**

Сводные данные о конвергенции и схождении боков выработки приведены на рисунке 5, а прогнозный срок службы – в таблице 2.



**Рисунок 5 – Сводные данные о конвергенции (а) и схождении боков (б) технологической сбойки № 2а 22а западной панели горизонта –620 м рудника 3 РУ**

Таблица 2 – Прогнозный срок службы технологической сбойки № 2а 22а западной панели горизонта –620 м рудника 3 РУ

Номер станции	Конвергенция, мм	Время наблюдений, сут	Средняя скорость за период наблюдений, мм/сут	Предельно допустимые значения конвергенции (без мер охраны), мм	Срок службы, сут (лет)
12P	15,0	54,0	0,28	90,0	321 (0,88)
13P	15,0	54,0	0,28	90,0	321 (0,88)
14P	10,0	54,0	0,19	90,0	473 (1,30)
15P	8,0	54,0	0,15	90,0	600 (1,64)
16P	6,0	54,0	0,11	90,0	818 (2,24)
17P	6,0	54,0	0,11	90,0	818 (2,24)
18P	4,0	54,0	0,07	90,0	1285 (3,52)

### Заключение

Основной задачей исследований являлась оценка возможности проведения подготовительных выработок (технологических сбоек) лавы № 8-в-3 по ранее пройденным в пределах пласта панельным выработкам путем их пересечения, а также оценка возможности их использования в технологическом цикле по выемке оставленных и подработанных запасов по IV сильвинитовому слою. Проводились исследования как визуальные, так и инструментальные.

После проведения разведочной выработки № 1 комбайном 4ПП-2С визуальными наблюдениями было установлено следующее:

- все панельные выработки заполнены обрушенными породами, хаотично расположенными и сильно уплотненными;
- ширина всех выработок уменьшилась до 1,5-2,0 м, а их высота уменьшилась на 1,0-1,2 м;
- междуходовые целики раздавлены, а слой каменной соли II-III и II, III сильвинитовые слои частично «смяты» и выдавлены в соседние выработки;
- межслоевая каменная соль III-IV и IV сильвинитовый слой над панельными выработками являются монолитными без видимых трещин и расслоений.

Согласно данным, полученным при инструментальных наблюдениях, можно говорить о следующем:

- наименьшая конвергенция «кровля-почва» выработки отмечалась на участке ее проведения, который примыкает к конвейерному штреку лавы № 7, тем самым ука-

зывая на то, что зона разгрузки существует не только в районе блоковых штреков под лавой № 7, но и в охранном междустолбовом целике, и в районе ранее пройденных панельных выработок;

- конвергенция и сближение боков на 22а западном панельном вентиляционном штреке больше, чем аналогичные параметры в разведочной выработке № 1 в районе ее проведения по конвейерному штреку лавы № 7 соответственно в 1,8-2,15 и 3,04-3,46 раза;

- прогнозный срок безремонтного поддержания выработки составит не менее 2,15 лет.

Результаты исследований, выполненных в сбойке № 2а, пройденной комбайном ПКС-8 позволили определить следующее:

- наименьшая конвергенция и сближение боков выработки отмечались на участке, который примыкает к выработанному пространству лавы № 7, наибольшие – в районе 22а западного панельного вентиляционного штрека, также как и в разведочной выработке № 1;

- прогнозный срок службы технологической сбойки № 2а, при достигнутой скорости деформирования элементов выработки, составляет 321-1285 суток.

#### Список использованных источников

1. Пузанов, Д.А. Результаты исследования устойчивости вскрывающих выработок при их проведении в подработанном нижней лавой IV силвинитовом слое на руднике 3 РУ ОАО «Беларуськалий» / Д.А. Пузанов, М.С. Мозговенко, В.А. Губанов // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 25-33.

2. Выбор мест заложения подготовительных выработок при их проведении в охранных междустолбовых целиках через 25-30 лет после завершения очистных работ в смежноотработанных лавах / В.А. Губанов [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 43-47.

3. Провести исследования геологического строения и прочностных свойств пород кровли и их изменчивость по длине 22-й западной панели по керну, отобранному из скважин эксплуатационной разведки (в охранном междустолбовом целике между лавами № 7 и № 6), пройденных на участке между сбойками № 1 и № 2 (не менее 2-х скважин). Исследовать динамику изменения содержания метана в выработанном пространстве над лавой № 7 по вновь пробуренным скважинам в вентиляционном штреке лавы № 8-в-3 на участке между главным вентиляционным штреком № 3 и сбойкой № 1: отчет о НИР (промежуточ. по дог. № 14/13, этап 1.2, 4.2) / Унитарное предприятие «Институт горного дела»; рук. В.А. Губанов; исполн.: Мозговенко М.С. [и др.]. – Солигорск, 2014. – 123 с. – № ГР 20131851.

---

**Polyakov A.L., Mozgovenko M.S., Yerokhin K.A.**

**The stability of technological crosscuts while crossing by them the panel workings at the angle of 30-35° driven in 1980-1990 on the horizon – 620 m of the mine № 3**

*In the article stated investigation results of the stability of technological crosscuts which cross the panel workings driven 20-30 years ago and which are intended for estimation of possibility of driving, maintenance, and later the use of workings in technological processes of mining of the underworked IV sylvinite layer after its uncovering.*

Поступила в редакцию 14.05.2015 г.

УДК 622.234.44:363.2

## ВОЗДЕЙСТВИЕ РАССОЛОВ НА СОЛЯНЫЕ ПОРОДЫ

Зольников Н.А., Климович В.В., Титова Н.В., Дешковский В.Н. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

*Представлены результаты лабораторных исследований воздействия насыщенных и ненасыщенных рассолов на образцы горных пород. В лабораторных условиях определен предел прочности на одноосное сжатие образцов соляных пород в зависимости от времени их увлажнения насыщенными и ненасыщенными рассолами, определены количественные показатели растворения образцов и физической модели.*

### Введение

Обследование горных выработок, по которым происходило движение рассолов, поступающих из забоя разведочной выработки № 12 юго-западного направления горизонта –445 м рудника 2 РУ, показало:

- поступающий рассол агрессивен к соляным породам;
- наблюдается увлажнение и растворение преимущественно сильвинита, частичное растворение каменной соли в составе соляных пород;
- наблюдается увлажнение, набухание и размыв глин в глинистых слоях и прослоях в составе соляных пород.

В большей степени растворение соляных пород вокруг выработки происходит по контакту глинистых прослоек с сильвинитовыми породами. Это может объясняться более быстрым увлажнением глинистых прослоек рассолами и большей проницаемостью вглубь массива и, как следствие, растворением сильвинита по контакту, что подтверждается исследованиями других авторов [1, 2]. Возможное ослабление и образование микрополостей способствует ускорению циркуляции рассолов по этим каналам как вглубь массива, так и вдоль выработки.

Воздействие рассолов на соляные породы на участке возведения гидроизоляционных перемычек является актуальной задачей.

### Результаты исследований

Рассол, поступающий в разведочную выработку № 12 на шахтном поле 2 РУ, образовался при выщелачивании преимущественно каменной соли, не насыщен по КС1 (таблица). Поэтому поступление такого рассола в горные выработки, а так же движение его по контакту «гидроизоляционная перемычка - соляные породы» (рисунок 1) приводят к растворению сильвинита в составе соляных пород.

Для оценки воздействия ненасыщенного рассола на соляные породы выбраны следующие показатели: потеря массы и объема, скорость уменьшения массы и объема вследствие увлажнения и растворения соляных пород, предел прочности на одноосное сжатие. Оценка воздействия насыщенного рассола на соляные породы выполнена по пределу прочности на одноосное сжатие.

Для проведения исследований по изучению воздействия ненасыщенного рассола на соляные породы в выработке юго-западного направления горизонта –445 м рудника 2 РУ были отобраны монолиты из сильвинитового слоя 2. В экспериментах использовался ненасыщенный рассол, отобранный из забоя разведочной выработки № 12 юго-западного направления горизонта –445 м рудника 2 РУ.

Таблица – Химический состав рассолов из забоя разведочной выработки № 12 и в рассолосборнике на руднике 2 РУ

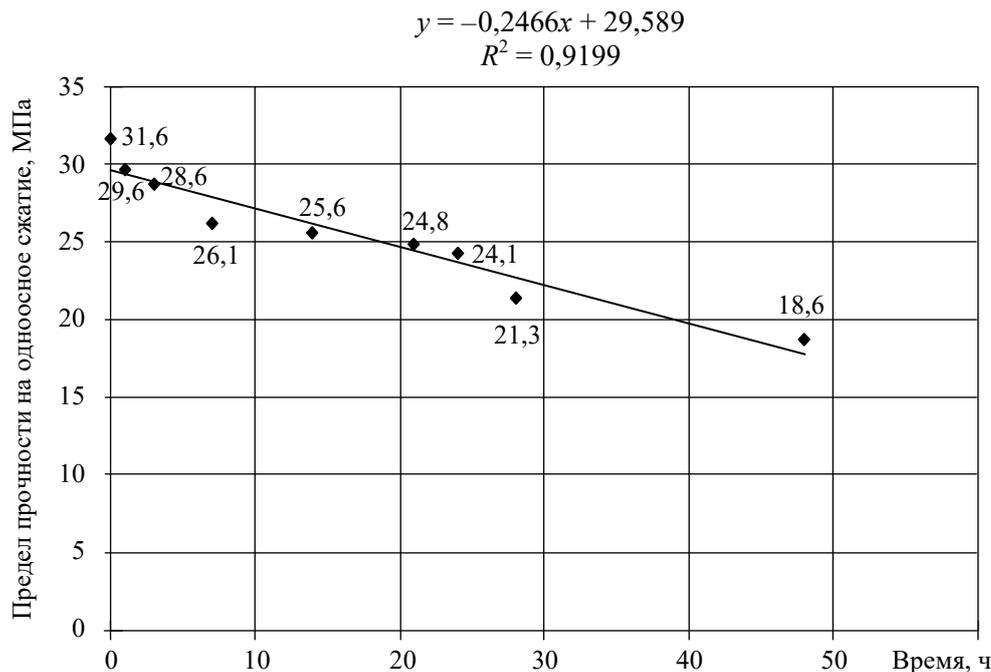
Место отбора рассолов, дата	Массовая доля солей, %						∑ солей, %	Минерализация, г/л	Сухой остаток, %
	KCl	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	NaBr			
Забой разведочной выработки № 12 12.08.2011	0,21	23,87	0,41	0,16	0,31	-	24,5	292	24,54
Забой разведочной выработки № 12 15.09.2011	0,207	23,059	0,432	0,086	0,324	0,015	24,127	287,4	24,13
Средние показатели рассола из забоя разведочной выработки № 12 с 12.08.2011 по 15.09.2011	0,208	23,56	0,421	0,123	0,317	0,015	24,31	289,7	24,33
Рассолосборник 03.09.2011	0,56	24,71	0,425	0,152	0,286	0,013	26,14	311,2	26,10



**Рисунок 1 – Растворение сильвинитовых пород (справа) в боковой стенке разведочной выработки № 12 по контакту с временной гидроизоляционной перемычкой (слева)**

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Из одного породного слоя в сильвинитовом монолите изготовили образцы кубической формы с величиной граней 5 см, из которых 3 образца являлись контрольными для получения среднего значения предела прочности сильвинитовых пород на одноосное сжатие при естественной влажности (без увлажнения рассолом). Остальные сильвинитовые образцы погружались в емкости с ненасыщенным рассолом, и после выдерживания (увлаж-

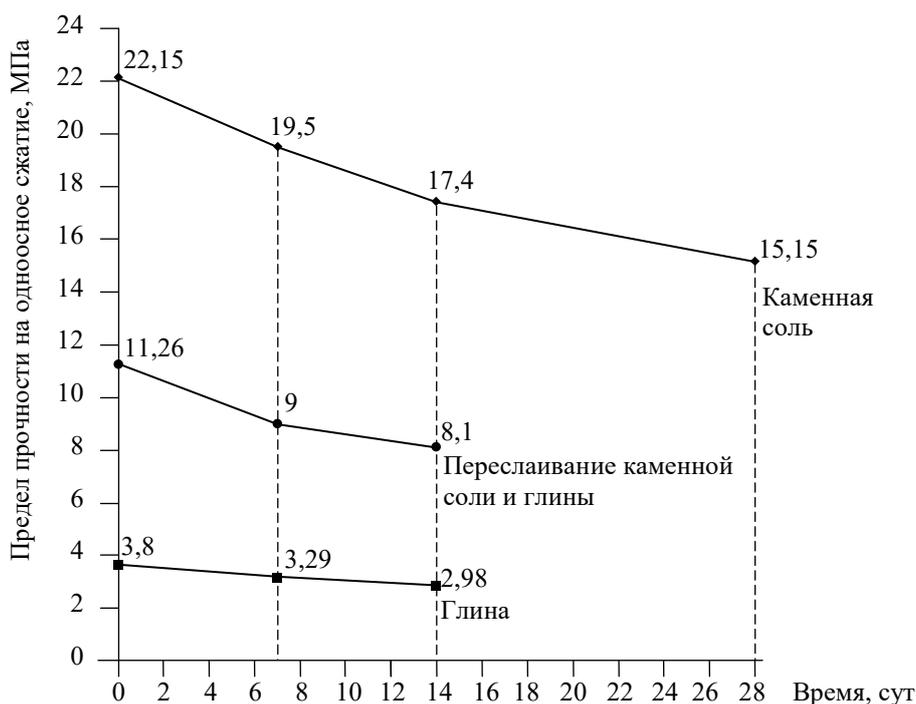
нения) в течение 1, 3, 7, 14, 21, 24, 28, 48 часов определяли предел прочности на одноосное сжатие с помощью гидравлического пресса ПММ-125 в соответствии с ГОСТ-21153.2-84. Каждый исследуемый образец помещался в отдельную емкость с одинаковым объемом рассолов в количестве 1 литр без его циркуляции. Результаты лабораторных исследований показали, что под воздействием ненасыщенного рассола очень быстро уменьшаются прочностные свойства сильвинитовых образцов (рисунок 2), что подтверждено результатами других исследователей [2-4]. По истечении 48 часов нахождения в ненасыщенном рассоле уменьшение прочностных свойств составило 41 %.



**Рисунок 2 – Предел прочности на одноосное сжатие сильвинитовых образцов в зависимости от времени нахождения их в ненасыщенном рассоле**

При выдержке образцов сильвинитовых пород в ненасыщенном рассоле более 2-х суток происходило существенное изменение их первоначальной формы. На гранях сильвинитовых образцов появлялись ячеистые полости неправильной формы, которые проникали внутрь образца на 5-10 мм, что не позволяло получить достоверные данные при определении фактической площади поверхности сжатия и высоты образца для определения предела прочности на одноосное сжатие.

Аналогичные исследования были проведены на соляных образцах различного состава, состоящих из каменной соли и глинистых пород, при воздействии на образцы насыщенного рассола (оборотный маточный раствор обогатительной фабрики 4 РУ). Образцы горных пород изготовили из кернов геологоразведочной скважины № 495S, пробуренной в кровлю выработки сбора рассолов № 34 на горизонте – 440 м рудника 4 РУ. Результаты лабораторных исследований показали, что с увеличением времени воздействия (увлажнения) насыщенного рассола на образцы соляных пород их прочностные свойства уменьшаются (рисунок 3). Следовательно, массив пород по контуру горной выработки, заполненной рассолами, с течением времени будет ослабляться на 22-32 %. В этой связи породы по контуру горной выработки могут дополнительно деформироваться и разрушаться.



**Рисунок 3 – Предел прочности на одноосное сжатие образцов соляных пород в зависимости от времени нахождения их в насыщенном рассоле**

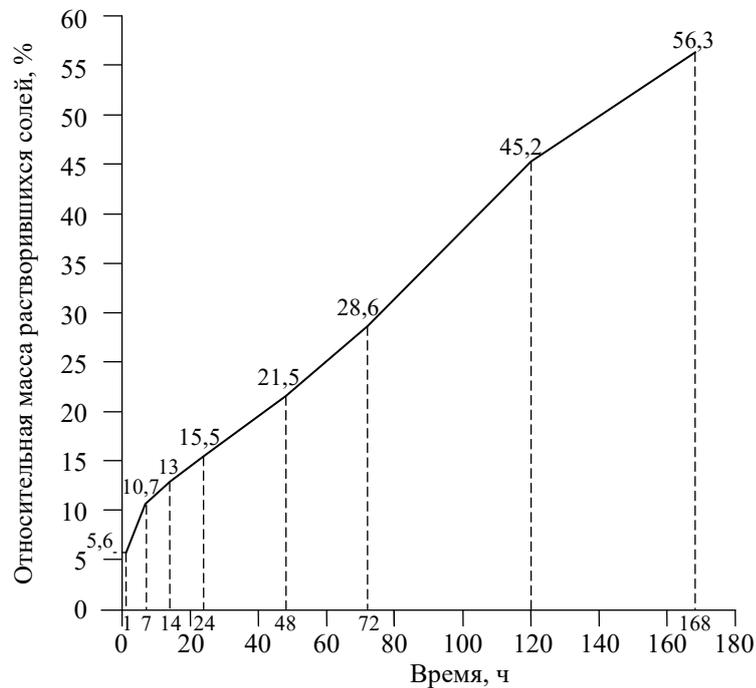
Эксперименты по определению количественных показателей изменения формы и массы образцов, скоростей уменьшения массы и объема вследствие увлажнения и растворения сильвинитовых пород в ненасыщенном рассоле проводились по следующей методике. Так же как и в предыдущем случае из монолитов изготовили сильвинитовые образцы кубической формы с величиной грани 5 см. Определялись геометрические размеры образцов ( $a$ ,  $b$ ,  $h$ ), объем, масса: в естественном состоянии; в увлажненном состоянии после выдерживания в ненасыщенном рассоле; в сухом состоянии (после сушки при температуре 100-110 °С) после выдерживания в ненасыщенном рассоле.

Шесть образцов являлись контрольными для определения плотностных и влажностных свойств образцов сильвинитовых пород в их естественном состоянии для получения сравнительных данных по всем показателям и их изменениям при воздействии ненасыщенного рассола.

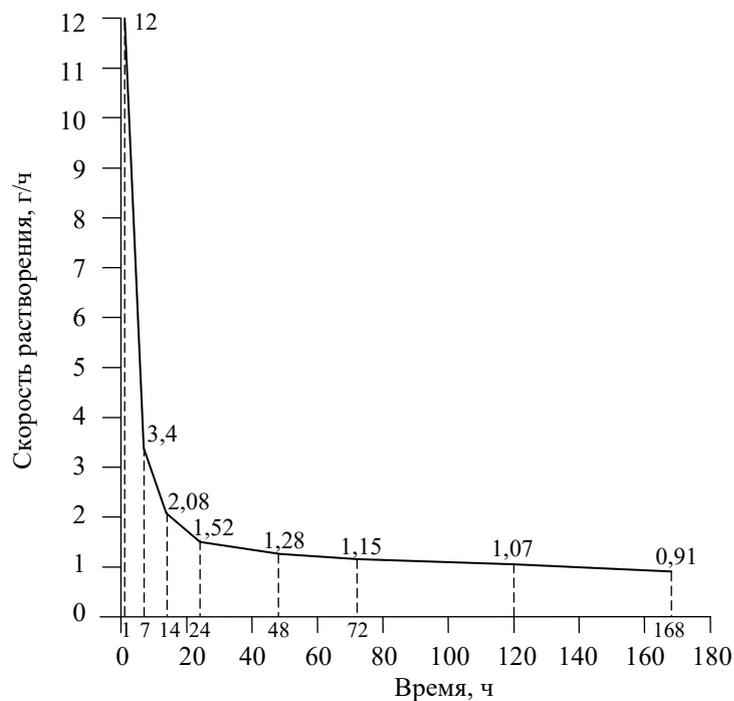
Каждый образец помещался в отдельную емкость с одинаковым объемом ненасыщенного рассола в количестве 1 литр без его циркуляции. Образцы выдерживались (увлажнялись) в течение 1, 7, 14, 24, 48, 72, 120, 168 часов. При воздействии на образцы постоянного объема рассолов без его циркуляции и без постоянного пополнения новыми рассолами происходило уменьшение их массы (рисунок 4).

Скорость растворения сильвинитовых пород в образцах наиболее высока в первые часы, за семь часов она составила 72 % (рисунок 5). Растворению в первую очередь подвергаются породы с более высоким содержанием КСl. Используя полученные данные, ориентировочно определен объем растворенных сильвинитовых пород в стенках выработки по ее периметру и параметры увеличения ширины выработки вследствие растворения сильвинитовых пород. Так за сутки при скорости растворения 1,52 г/ч объем растворенных пород составит 17,4 см<sup>3</sup>, за 3 суток при скорости растворения 1,15 г/ч – 34,4 см<sup>3</sup>, за 7 суток соответственно – 72,8 см<sup>3</sup>. Учитывая, что в первую очередь растворяются сильвинитовые слои 2 и 3, суммарная мощность которых составляет около 2,8 м

по периметру выработки, то глубина растворения сильвинитовых пород на этих участках составит: за 1 сутки 0,6 мм, за 3 суток 1,4 мм, за 7 суток 2,6 мм.



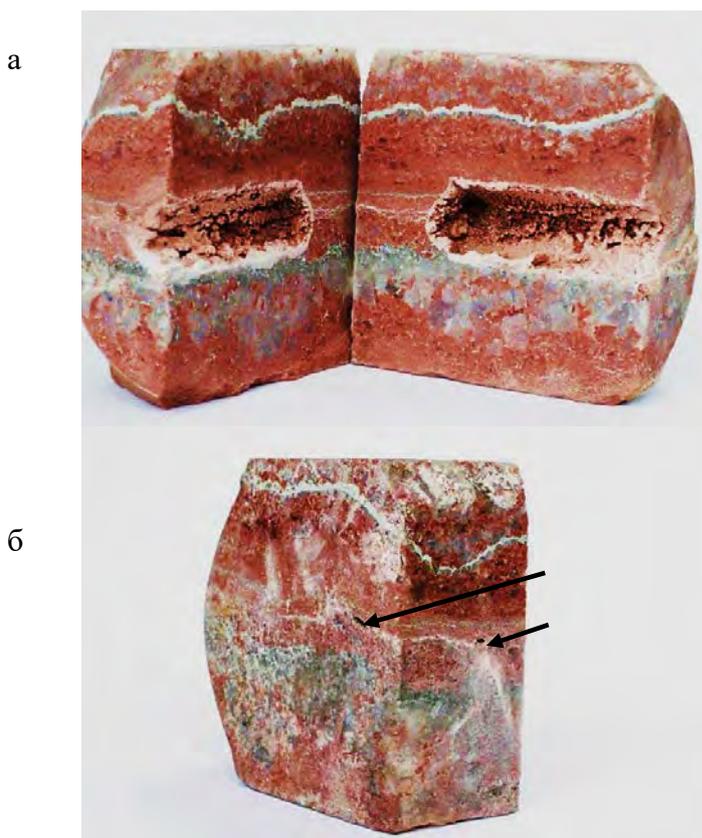
**Рисунок 4 – Изменение относительной массы сильвинитовых образцов в зависимости от времени воздействия ненасыщенных рассолов**



**Рисунок 5 – Скорость растворения сильвинитовых пород в зависимости от времени воздействия постоянного объема ненасыщенного рассола**

Эти приближенные данные определены для условия отсутствия движения и циркуляции рассола в горной выработке и могут быть использованы для прогноза величины растворения сильвинитовых пород у герметичной гидроизоляционной перемычки. Фактически, при постоянном рассолопритоке в объеме 4,5 м<sup>3</sup>/час или 108 м<sup>3</sup>/сутки рассол может обновляться в сечении выработки у гидроизоляционной перемычки за 1 сутки не менее 13,5 раз. Следовательно, скорость и объем растворенных сильвинитовых пород в боковых стенках выработок будут существенно выше, а, следовательно, и глубина растворения внутрь массива. Наличие глинистых прослоек в составе сильвинитовых слоев из-за их способности к насыщению влагой и ее фильтрации еще в большей степени ускоряют процесс растворения. Исходя из предполагаемого значения суточной циркуляции ненасыщенного рассола, глубина растворения может достигать: за 1 сутки до 8 мм, за 3 суток до 18,9 мм, за 7 суток до 35 мм.

Оценка воздействия постоянного объема ненасыщенного рассола на приконтурный массив вокруг горной выработки выполнялась в лабораторных условиях на физической модели из сильвинитовой породы. Отверстие диаметром 30 мм в физической модели, имитирующее горную выработку, заполнили ненасыщенным рассолом и создали избыточное давление 0,2 МПа. Разгерметизация модели произошла по истечении 44-х суток после ее выдержки под давлением 0,2 МПа через растворенные полости в боковой и торцевой стенках модели (рисунок 6).



стрелками показаны места разгерметизации;

а – внутренняя сторона модели; б – внешняя сторона модели

**Рисунок 6 – Характер разгерметизации физической модели вследствие растворения сильвинитовых пород**

На продольном разрезе физической модели отчетливо видно, что растворение происходит одновременно не по всей полости отверстия (выработки). Ячеистая форма

полостей растворения, их неравномерное распределение по стенкам свидетельствуют о том, что в первую очередь растворяются участки и области с более высоким содержанием солей калия и магния.

### Выводы

По результатам лабораторных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Увлажнение соляных пород насыщенным рассолом приводит к уменьшению их прочности: каменной соли на 32 %, пород с переслаиванием каменной соли и глины на 28 %, глинистых пород на 22 %.

2. Увлажнение сильвинитовых пород ненасыщенным рассолом приводит к уменьшению их прочности на 41 %.

3. В стационарных условиях при отсутствии циркуляции ненасыщенного рассола скорость растворения сильвинитовых пород в течение первых 14 часов изменяется от 12 до 2,1 г/ч. В течение последующих 154 часов (6,4 суток) уменьшается с 2,1 г/ч до 0,9 г/ч, что в среднем составляет 1,2 г/ч.

4. Основным фактором воздействия ненасыщенных рассолов на приконтурный массив горной выработки является быстрое растворение сильвинитовых пород по контуру выработки.

5. Одним из мероприятий по уменьшению растворения соляных пород, сохранению их устойчивости вблизи гидроизоляционных перемычек с целью повышения их герметичности и срока службы может быть дополнительная гидроизоляция пород по контуру горной выработки со стороны поступления рассолов.

### Список использованных источников

1. Полянина, Г.Д. Технология и безопасность разработки Верхнекамского калийного месторождения / Г.Д. Полянина, А.Н. Земсков, Ю.Н. Падерин; под ред. О.А. Ханжина. – Пермь: Кн. изд-во, 1990. – 262 с.

2. Зильбершмидт, В.Г. Исследования влажности горного соляного массива и ее влияние на прочностные свойства пород Верхнекамского калийного месторождения / В.Г. Зильбершмидт, О.А. Тиментеев // Технология и безопасность горных работ. – 1976. – С. 132-137.

3. Проскураков, Н.М. Физико-механические свойства соляных пород / Н.М. Проскураков, Р.С. Пермяков, А.К. Черников; под ред. И.Г. Сидорова. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.

4. Асанов, В.А. Влияние рассолов на механические свойства соляных пород / В.А. Асанов, А.В. Евсеев // ГИАБ. – 2010. – № 2. – С. 363-366.

---

Zolnikov N.A., Klimovich V.V., Tsitova N.V., Deshkovsky V.N.

### Brines' influence on salt rocks

*The laboratory investigation results of the influence of saturated and unsaturated brines into salt rock samples are presented. In the laboratory conditions were obtained uniaxial compression strength of salt rock samples depending on their moistening time with saturated and unsaturated brines. Quantitative measures of the dissolution of salt rocks samples and the physical model were obtained.*

Поступила в редакцию 01.04.2015 г.

УДК 662.641.013.8:628.5(047.1)(476)

## ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТОРФЯНЫХ БРИКЕТОВ ЧЕРЕЗ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ АСПИРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ИХ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА

Березовский Н.И., Борисейко В.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*Представлены некоторые результаты изучения зарубежного опыта по оптимизации дальнейшего развития энергоисточников с учетом экономических и экологических аспектов. С целью увеличения конкурентоспособности торфяного топлива через снижение себестоимости предложены усовершенствования базовой технологии отечественных производителей торфяных топливных брикетов, которые позволят значительно снизить потери электроэнергии, воды, готового качественного сырья, и одновременно уменьшить выбросы пыли в окружающую среду.*

### Введение

Ученые и промышленники многих стран мира все чаще и чаще задаются вопросом: какие виды топлива обеспечат в ближайшем будущем и в перспективе получение электроэнергии и тепла для глобальной промышленности и увеличивающегося объема жилья, а также работу столь стремительно растущего парка автотранспорта.

В последнее десятилетие постоянно на слуху возобновляемые источники энергии, получаемые с помощью солнечных батарей на крышах и фасадах зданий, вращающихся генераторов на ветру, энергии воды, сжигания биотоплива и др. Все эти эксперименты происходят на фоне надежного тыла, обеспеченного в основном пока еще традиционными полезными ископаемыми, которые относят к невозобновляемым источникам энергии. Это в первую очередь нефтепродукты, природный газ, бурый и каменный уголь. Одним из основных видов энергообеспечения жизнедеятельности людей по-прежнему является и атомная энергия.

Наряду с этим необходимо отметить, что немаловажным источником энергии является такое полезное ископаемое, как торф, отнесенное к медленно возобновляемым источникам энергии. И это промежуточное положение в настоящее время привело к снижению его использования в виде топлива. Одновременно с реализацией Государственной программы «Торф», направленной на значительное обновление основных фондов торфопредприятий Беларуси и увеличение площадей добычи торфа, увеличилась, как ни парадоксально, себестоимость торфяного топлива, что в определенной степени также повлияло на снижение объемов реализации торфяного топлива.

По разным оценкам в мире от 250 до 500 млрд т торфа (в пересчете на 40 % влажность), он покрывает около 3 % площади суши. При этом, в северном полушарии торфа больше чем в южном, заторфованность растет при движении с юга на север. Так, в Германии залежи торфа занимают 4,8 %, в Швеции – 14 %, в Финляндии – 30,6 % земель. В России доля занятых торфяниками земель достигает 31,8 %. Наибольшее количество залежей торфа – в Центральной России (особенно в Рязанской, Московской, Владимирской областях). Достаточные запасы торфа имеются на Украине (месторождение Морочно-1). Также большие запасы торфа имеются в Индонезии, Канаде, Беларуси, Ирландии, Великобритании, ряде штатов США [1]. По оценкам канад-

ской Peat Resources (2010 год), на первом в мире месте по запасам торфа (170 млрд т) – Канада, на втором – Россия (150 млрд т).

Выявленные и разведанные запасы торфа в Республике Беларусь составляют 4,704 млрд т, благодаря чему отечественные базовые технологии использования торфа уже развиваются на протяжении почти 90 лет.

В Республике Беларусь торф в первую очередь используется как бытовое топливо в виде торфяных брикетов с малым содержанием влаги (14-20 %) и высокой теплотой сгорания (до 4500 ккал/кг). Одна тонна брикетов заменяет 2,5-3 м<sup>3</sup> дров или 1,6 т бурого угля [2, 3]. В последнее время набирает обороты использование торфяного топлива в большой энергетике и строительной отрасли. Так, например, цементная промышленность безотходно сжигает торфяные брикеты, так как зола в процессе обжига переходит в состав ингредиентов готового цемента, полностью подходящая по химическому составу.

### Результаты изучения зарубежного опыта

Бесспорным лидером энергетических реформ в мире является Германия. Аэрокосмический центр и центр солнечной энергии и водорода в Штутгарте, институт климата, окружающей среды и энергии в Вуппертале, университет Дуйсбург-Эссен и Рурский университет в Бохуме, институт энергии ветра и технологий энергетических систем Фраунгофера в Касселе, институт угольных исследований Макса Планка в Мюльхайме на Рейне, Центр европейских экономических исследований в Мангейме – и это далеко не полный перечень тех организаций, которые ищут пути в новую всемирную энергетику, создают энергосистему будущего.

В течение примерно десяти последних лет растет вклад в энергообеспечение этой страны возобновляемых источников энергии, таких как ветер и солнце. Жесткая структура крупных центральных электростанций, сбалансировано поставляющих электроэнергию в сети потребителей домашних хозяйств и промышленности, преобразуется в маломасштабные комплексные сети различного производства энергии и различного спроса потребителями. Реорганизация немецких энергосистем ускорилась после того, как Бундестаг 30 июня 2011 года в выдвинутом постепенном голосовании принял решение о поэтапном отказе использования атомной энергии. Лицензия на эксплуатацию семи атомных электростанций общей мощностью 9 ГВт вышла тем самым из непосредственного контроля [4].

Замену для недостающей мощности атомных электростанций призваны обеспечить возобновляемые источники энергии. Ветровые турбины, фотоэлектрические солнечные модули и электростанции на биомассе практически соответствуют этим требованиям: в 2013 году контролируемые возобновляемые источники энергии составили в целом 23,6 % ко всей энергетической продукции Германии. По сравнению с 2010 годом увеличение составило 30 %, а с начала нового тысячелетия имеется вклад возобновляемых источников в выработку энергии с четырехкратным увеличением [4]. Распределение возобновляемых источников энергии в Германии по годам представлено в таблице и на рисунке 1.

Несмотря на то, что солнце, ветер, биотопливо и другие возобновляемые источники энергии имеют большую долю производства в Германии, ископаемые источники по-прежнему доминируют. И это еще будет оставаться так долгое время.

Так, например, в Лаусвардском порту Дюсельдорфа электростанция, сети которой будут построены в 2016 году, будет работать с общей эффективностью горючего вещества в виде природного газа, которая должна достичь 85 %. Этот проект будет ми-

ровым рекордом. У старых угольных электростанций этот показатель едва достигает 40 процентов. Встает вопрос, почему в переходный период энергетических реформ вообще еще строят большие электростанции? Эксперты сходятся во мнении: для того, чтобы компенсировать колебания солнечной и ветровой энергии, еще десятилетия понадобятся обычные электростанции, которые работают с постоянной производительностью. И для этого будет впредь сжигаться газ и уголь. Поэтому важно иметь надежный источник энергии и создавать эффективные электростанции [4].

Таблица – Общее производство энергии возобновляемых источников в Германии по годам

Года	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Мощность энергии, ТВт·ч	36	39	45	46	57	63	72	88	93	95	105	124	144	148

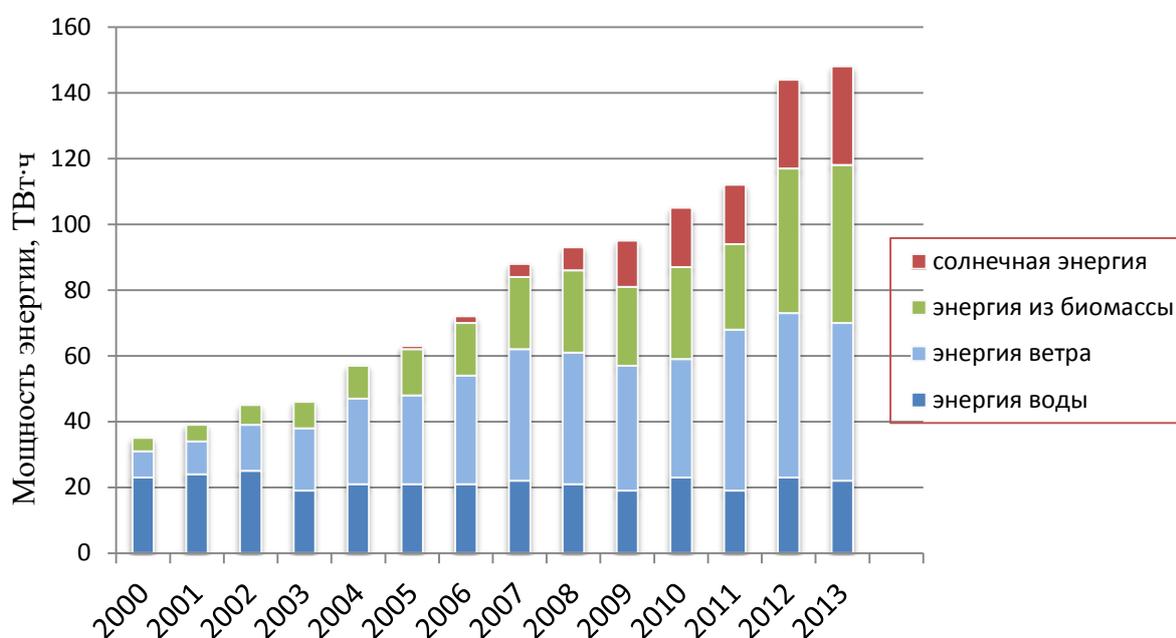


Рисунок 1 – Диаграмма распределения возобновляемых источников энергии в Германии за 14 лет

Наряду с этим необходимо отметить, что по значимости в общем потреблении энергоносителей нефтепродукты на первом месте (33 %), и они являются наиболее важным ископаемым видом топлива немцев. Они в основном используются для транспорта и небольшая часть – как топочный мазут.

Источником энергии № 2 является каменный и бурый уголь (25 %), а затем – природный газ (21,5 %). Возобновляемые источники энергии составляют лишь 12 %, но при этом они обогнали на круг ядерную энергию, которая близка по вкладу к 8 %.

Несмотря на все это, в Германии основные потребности энергии покрываются электростанциями, которые сжигают дешевый бурый уголь. При возрастании потребления энергии постепенно подключаются и поставщики, работающие на более дорогом каменном угле. Современные газовые электростанции чище, чем угольные, но при этом они также и дороже [4].

### Результаты исследований

Вполне очевидно и бесспорно то, что в Республике Беларусь также необходимо развивать технологии возобновляемых источников энергии. Но в одночасье это невозможно ввиду больших капитальных вложений и ряда других причин. В настоящее время наша республика пока не имеет таких возможностей развития энергетики, как Германия, и поэтому очень актуальным является по-прежнему использование природного газа и торфа на базе уже созданной инфраструктуры. При этом необходимо отметить, что одна тонна условного топлива (т у.т.), полученная из газа, дороже более чем в три раза полученной из торфяного брикета. Значительным аспектом является и то, что газ импортируется, а торф имеется в республике. Это, в первую очередь, топливо в виде торфяных брикетов, а также в виде фрезерного торфа для пылевидного сжигания. За последнее десятилетие многие торфопредприятия осуществили реконструкцию и модернизацию, обеспечившую обновление основных фондов брикетных заводов, а также строительство полей добычи торфа на торфяных месторождениях с целью обеспечения добычи фрезерного торфа, являющегося исходным сырьем для производства брикетов. И этот факт никак нельзя сбрасывать со счетов при выборе энергоисточников для дальнейшего развития республики, а также и для реализации торфяной продукции на экспорт. Потенциальные возможности работающих брикетных заводов в Республике Беларусь в настоящее время составляют около 1,5 млн т торфяных брикетов в год, что эквивалентно 0,9 млн т у.т. [5]. Однако, фактически производство загружено только чуть больше 70 %, что вызвано недостаточным спросом данного вида энергоносителя (в 2014 году произведено 1,095 млн т топливных брикетов). Уже даже это обстоятельство свидетельствует об увеличении себестоимости произведенных брикетов, не позволяющее достойно конкурировать на энергетическом рынке.

Твердое топливо может содержать серу в следующих формах: колчедана  $Fe_2S$  и пирита  $FeS_2$ , в составе молекул органической части топлива и в виде сульфатов в минеральной части. Соединения серы в результате горения превращаются в оксиды серы, причем около 99 % составляет сернистый ангидрид  $SO_2$  [6].

Сернистость углей в зависимости от месторождения составляет 0,3-6,0 %. Сернистость горючих сланцев достигает 1,4-1,7 %, торфа – 0,1 %.

Из сравнительного анализа следует, что выбросы оксида углерода при сжигании каменного угля превышают в 1,36 раза выбросы, образующиеся при сжигании торфяных брикетов, а диоксида серы – в 6,1 раза. Что касается бурого угля: выбросы диоксида серы превышают в 2,7 раза, лишь выбросы оксида бурого угля наоборот ниже значения торфяных брикетов в 1,3 раза. Наряду с этим необходимо отметить, что выбросы твердых частиц при сжигании каменного угля в сравнении с брикетом превышают в 2,7 раза, соответственно бурого угля – в 1,98 раза [7].

Торфяной брикет по своим характеристикам очень близок к бурому углю. Как видно из анализа, торфяные брикеты являются более предпочтительным топливом, чем уголь, имеющий до сих пор широкое применение в зарубежных странах. И это значит, что апеллирование новомодным выражением о возобновляемых источниках энергии должно быть осторожным, иначе «неожиданные» затраты могут быть непредсказуемыми.

Значительным является и то, что для сжигания торфяных брикетов необходимо применять соответствующее оборудование, обеспечивающее более полное сжигание топлива с более высоким коэффициентом полезного действия (как это, например, делает Швеция).

Снижение себестоимости торфяных брикетов возможно не только за счет увеличения объемов производства, но и за счет технических улучшений технологии их про-

изводства. Как один из вариантов улучшения технологии предлагается реконструкция аспирационной системы. В целях снижения запыленности производственных помещений и создания нормальных санитарно-гигиенических условий на рабочих местах, технологическое оборудование торфобрикетных заводов, являющееся источником повышенного пылевыделения, оснащается аспирационными системами.

Существует несколько технологий очистки воздуха от пыли.

1. *Механическая очистка* происходит за счет осаждения частиц под воздействием внешних сил, в том числе очистка воздуха в механических пылеуловителях (пылеосадочных камерах, циклонах, инерционных пыле- и брызгоуловителях), применяемых в качестве грубой очистки.

2. *Мокрая очистка* обеспечивает осаждение частиц за счет их взаимодействия с жидкостью в мокрых пылеуловителях (полых, насадочных или барботажных скрубберах, пенных аппаратах, трубах Вентури и др.).

3. *Очистка при помощи фильтров* осуществляется за счет задерживания частиц в фильтрующем материале (фильтры волокнистые, ячеиковые, с насыпными слоями зернистого материала, масляные и рукавные).

4. *Очистка под действием электрического поля* (электрофильтры, являющиеся аппаратами тонкой очистки газов от пыли).

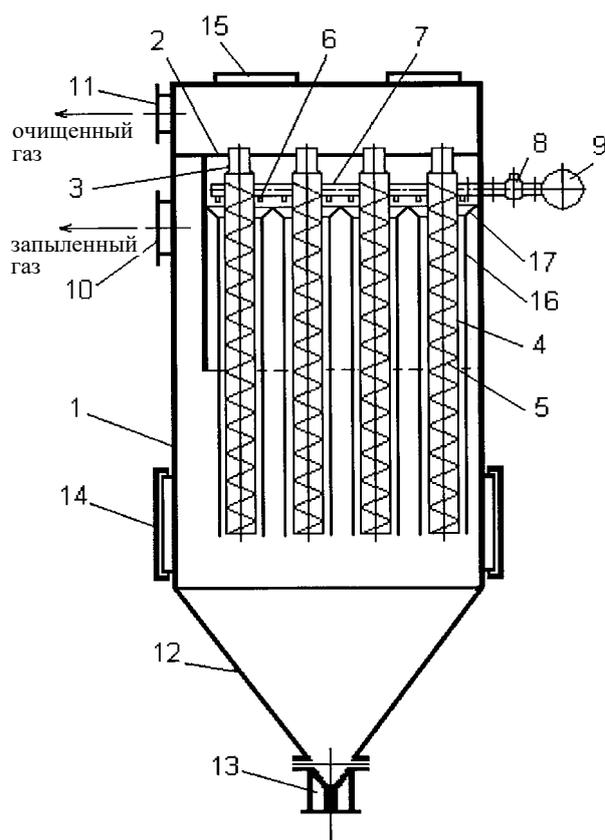
5. *Комбинированная очистка* включает в себя сочетание нескольких вышеуказанных технологий очистки воздуха от пыли [8].

Однако существующие аспирационные системы на торфобрикетных заводах Республики Беларусь морально и физически устарели. Имеющиеся конструкции обеспечивают требования санитарных норм и правил, однако мокрая ступень очистки воздуха одновременно создает унос ценных частиц пыли, пригодных для дальнейшего их использования как сырья для изготовления торфяных брикетов. Более того, эти системы оснащены мощными электродвигателями и в обязательном порядке используют техническую воду.

Для исключения таких значительных потерь и, соответственно, снижения себестоимости производства брикетов предлагается произвести замену мокрой очистки воздуха на сухую в виде тканевых фильтров. Наиболее эффективным способом улавливания мелкодисперсной пыли из отходящих газов и аспирационных выбросов различных технологических процессов из агрегатов является фильтрация. В ходе осуществления такого процесса газы проходят через фильтровальный материал, в качестве которого используется ткань с различными характеристиками.

Тканевые фильтры нашли широкое применение в черной и цветной металлургии, химической и нефтяной промышленности, в производстве строительных материалов и многих других отраслях народного хозяйства.

Рукавный фильтр с импульсной регенерацией для очистки запыленных газов (рисунок 2) состоит из корпуса 1, решетки 2, разделяющей корпус на камеры запыленного и очищенного газов, фильтровальных рукавов 3, выполненных из фильтровального материала. Фильтровальные рукава 3 закрыты снизу, закреплены на решетке, они состоят из металлических каркасов 5 с натянутым на них фильтровальным материалом 4. Регенерирующее устройство включает продувочные трубы 7 с соплами 6, электромагнитные клапаны 8 и ресивер 9, патрубки 10 для входа запыленных и 11 для выхода очищенных газов, пылесборный бункер 12, затвор 13, люки 14 и 15. Фильтровальные рукава 3 установлены коаксиально в оболочки 16, выполненные в виде металлических или полимерных цилиндров с открытым дном, в верхней части которых размещаются эжектирующие насадки 17 в виде усеченных конусов.



**Рисунок 2 – Типовая схема устройства и работы рукавных фильтров**

Процесс удаления слоя пыли с внутренней поверхности рукава будет носить лавинообразный характер, при этом возникает эффект разрежения, аналогичный создаваемому поршнем, движущимся в цилиндре. В результате такого процесса движения пыли в рукаве осуществляется его деформация (коллапс) и подсос газа через фильтровальный материал из камеры очищенного газа. Пылевой слой деформируется, потоком продувочного воздуха отделяется от фильтровального материала и сбрасывается в пылесборный бункер, откуда он выводится [9].

Однако в торфяной промышленности рукавные фильтры не применялись ранее по ряду известных причин: агрессивность вещества, взрывоопасность, липкость и прочее. Для подбора наиболее подходящего варианта рукавных фильтров по обеспыливанию воздушной смеси от торфа были проведены переговоры и встречи со многими европейскими производителями данной продукции. В их числе TSF-FILTER, PIONIER, NESTRO, SIMATEK.

Исходя из опыта эксплуатации существующих систем аспирации, основными критериями выбора явились:

- производительность системы обеспыливания  $12000 \text{ м}^3/\text{час}$ ;
- запыленность воздуха в рабочих помещениях не более  $2\text{--}4 \text{ мг}/\text{м}^3$ ;
- скорость запыленного воздуха в трубопроводе должна быть не менее  $10 \text{ м}/\text{с}$  в вертикальных и  $12 \text{ м}/\text{с}$  – в горизонтальных трубопроводах;
- транспортирование уловленной пыли на производство брикетов с минимальными затратами.

Рукавный фильтр с импульсной регенерацией для очистки запыленных газов работает следующим образом. Запыленные газы через патрубок 10 поступают в камеру запыленных газов. При прохождении пылегазового потока через фильтровальный материал 4 происходит разделение: газы попадают в камеру очищенных газов и затем через патрубок 11 сбрасываются в атмосферу, а пыль осажается на поверхности фильтровального материала. По мере осаждения пыли возрастает сопротивление фильтра, поэтому через определенное время автоматически производится регенерация рукавов.

При регенерации срабатывает электромагнитный клапан 8 и открывает доступ сжатого воздуха из ресивера 9 в продувочную трубу 7. Процесс регенерации заключается в том, что струя напорного воздуха, выходящая из сопла 6, эжектирует находящийся в камере газ в пространство, образованное фильтровальным рукавом 3 и оболочкой 16 [9].

По многим показателям возможной работоспособности фильтров с торфом, а также по ценовым предложениям выбор остановился на датской фирме «SIMАТЕК». Эта фирма разработала систему обеспыливания отходящих газов и аспирационных выбросов различных технологических процессов и создала рукавный фильтр с регенерацией фильтрующей поверхности (рисунок 3).



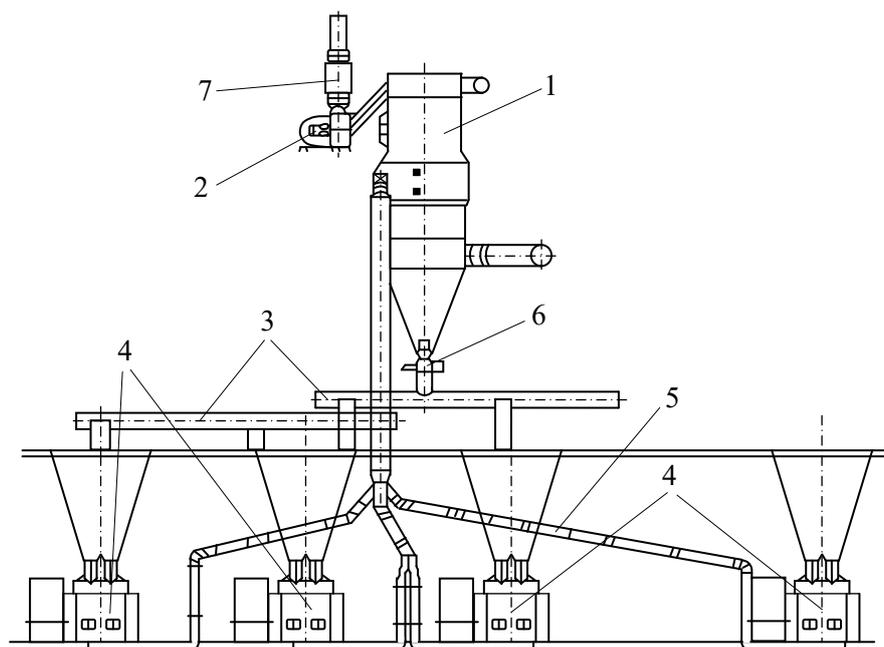
**Рисунок 3 – Общий вид фильтра марки Simpack 4T-R**

Система работает за счет разрежения, создаваемого вентилятором. Запыленный воздух собирается от прессов сетью трубопроводов и транспортируется в рукавные фильтры.

Рукавные фильтры расположены в сухом циклоне круглой формы, позволяющем в два этапа производить очистку: на первом этапе – предварительным динамическим очистителем за счет сил инерции, далее, на втором этапе происходит очистка остаточной пыли нисходящим потоком рукавным фильтром с автоматической регенерацией рукавов пульсирующей струей воздуха, что обеспечивает отделение частиц размером меньше микрона.

Автоматическое управление системой регенерации основано на изменении сопротивления потоку в фильтре, которое контролируется датчиком давления. Микропроцессор управляет работой клапанов, подающих импульсивно сжатый воздух внутрь рукавов. В результате происходит встряхивание наружной поверхности внутрирядных рукавных фильтров. Последовательная очистка рукавов продолжается до тех пор, пока перепад давления в фильтре не достигнет заданного уровня. Затем контроллер останавливает процесс. При возрастании сопротивления от налипания пыли на поверхности рукавов контроллер возобновляет цикл регенерации. Импульсная подача воздуха для регенерации фильтровальных элементов обеспечивается специальным компрессором, расположенным вне запыленного помещения.

Этот фильтр марки Simpack 4T-R удерживает перепад высокого давления. Одновременно для предотвращения взрыва пыли фильтр оснащен взрыворазрядником или альтернативно блокирующей системой. Благодаря большой устойчивости к воздействию резкого изменения давления, фильтр можно устанавливать в помещениях с взрывным клапаном в соответствии с новейшим европейским стандартом EN 14491. На торфобрикетном заводе запыленный воздух собирается от штемпелей всех прессов 4 сетью трубопроводов 5 и транспортируется в рукавный фильтр 1, где крупные частицы торфа под действием центробежных сил осаждаются и через шлюзовую затвор 6 возвращаются системой конвейеров 3 на прессование (рисунок 4). Мелкие частицы торфяной пыли оседают на наружной поверхности фильтровальных рукавов и после ее регенерации тем же путем возвращаются на прессование. А чистый отфильтрованный воздух выбрасывается в атмосферу через отводящий патрубок 7 [10].



1 – рукавный фильтр; 2 – центробежный вентилятор; 3 – система конвейеров;  
4 – прессы; 5 – сеть трубопроводов; 6 – шлюзовой затвор; 7 – отводящий патрубок

**Рисунок 4 – Система обеспыливания штемпелей прессов**

Данная система обеспыливания обеспечивает нормальные санитарно-гигиенические условия труда и значительный экономический эффект по сравнению с применяемой в настоящее время трехступенчатой комбинированной системой обеспыливания с использованием мокрых скрубберов.

Большим плюсом такой конструкции является то, что осевшая на поверхности рукавов пыль осыпается и попадает в бункер, а далее подается в качестве высушенного готового материала для производства брикетов.

Проведенные предварительные испытания рукавных фильтров очистки воздуха производственных помещений и рабочих зон от пыли на ОАО «ГБЗ «Усяж» подтверждают факт их практического использования и в торфяной промышленности. Срок эксплуатации рукавных фильтров достигает 2 года. Стоимость нового полного комплекта рукавов составляет около 700 евро.

В результате этой реконструкции экономия электроэнергии составила 212000 кВт·ч/год, экономия воды – 75000 м<sup>3</sup>/год, что составляет экономический эффект 237 млн бел. руб. Снижение выбросов твердых частиц в общей массе 17,2 т/год и, соответственно, их полное использование для производства брикетов. Это, в свою очередь, обеспечивает экономию сырья (фрезерного торфа 40 % влажности) 40,5 т/год, что эквивалентно 1 млн бел. руб. Уменьшение налога на выбросы составило 22 млн бел. руб., уменьшение налога на добычу воды – 10,5 млн бел. руб., уменьшение налога на сброс в шламовую канализацию – 28,9 млн бел. руб. В связи с уменьшением использования воды экономия электроэнергии насосными электродвигателями составила 39800 кВт·ч/год, что составляет экономический эффект 43,7 млн бел. руб. Затраты на внедрение составили 1395 млн бел. руб., соответственно срок окупаемости составляет 4,1 года.

После успешных испытаний фильтра датской фирмы «SIMАТЕК» в течение одного года на этом же брикетном заводе было проведено испытание другой системы

очистки воздуха сухим способом – обеспыливание зевов прессов. При разработке этой системы аспирации возникали некоторые затруднения в связи с наличием тумана в составе воздушной смеси. Для исключения появления «точки россы» дополнительно понадобилась теплоизоляция воздухопроводов от зевов прессов до самого модульного фильтра Simpract 4T-R, отличительной особенностью которого является возможность использования его для отделения не только сухих, но и слегка липких частиц пыли. Экономия средств составляет приблизительно столько же, как и при обеспыливании штемпелей прессов.

Следующим этапом научной разработки является внедрение рукавных фильтров с импульсной очисткой на брикетных заводах с паровыми трубчатыми сушилками типа «Цемаг» – третьей системы очистки воздуха от торфяной пыли сухим способом из самой сушилки. Учитывая то, что захват высушенного материала сушильным агентом в паровых трубчатых сушилках достигает 30 %, необходимость улавливания этого материала с целью его дальнейшего использования для производства брикетов очевидна и еще более актуальна. В существующих системах аспирации захваченный уже сухой торф проходит через мокрый скруббер и вместе с водой выбрасывается в шламовую канализацию, что естественно, увеличивает себестоимость торфяных брикетов. Более того, эксплуатационные затраты на очистку полей фильтрации и поддержание работоспособности шламовой канализации также ложатся на себестоимость торфяных брикетов.

На торфобрикетных заводах республики используется около двадцати таких типов сушилок, суммарная мощность которых составляет 1,1 млн т фрезерного торфа.

### Заключение

Проведенные предварительные испытания рукавных фильтров на двух системах обеспыливания (штемпелей и зевов торфобрикетных прессов) подтверждают возможность их использования и в торфяной промышленности. Удельная экономия на одну тонну брикетов электроэнергии составляет 4,7 кВт·ч, воды – 0,83 м<sup>3</sup>. Внедрение рукавных фильтров на обеспыливании штемпелей и зевов прессов на всех брикетных заводах республики позволит выпустить без дополнительных затрат около 1000 тонн брикетов в год, а также сэкономить около 7 млн кВт·ч/год и около 1,245 млн м<sup>3</sup>/год воды. А обеспечив на всех имеющихся в торфяной промышленности паротрубчатых сушилках поэтапное внедрение рукавных фильтров, позволяющих производить улавливание и подачу уносимого сухого торфа в виде пыли на изготовление брикетов хотя бы 20 %, можно дополнительно получить до 220 тыс. т брикетов в год. При этом дополнительно можно обеспечить экономию электроэнергии и воды, снижение налоговой нагрузки, количество которых будет известно после дополнительной детальной проработки. Именно поэтапное внедрение новых технологий позволит снижать себестоимость торфяных брикетов и повышать их конкурентоспособность на энергетическом рынке.

### Список использованных источников

1. Торф // Википедия – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Торф>. – Дата доступа: 20.05.2015.
2. Березовский, Н.И. Инновационные энерго- и ресурсосберегающие технологии производства брикетов из торфа / Н.И. Березовский, В.В. Борисейко // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 1. – С. 48-55.

3. По страницам полувековой истории торфяной промышленности (1917-1967 гг.) // Торфяная промышленность. – 1967. – № 2. – С. 41-46.
  4. Бучер, Р. Bild der Wissenschaft / Р. Бучер, Ф. Аустен // Немецкий научно-популярный журнал. – 2014. – № 5. – С. 78-88.
  5. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 760 с.
  6. Юренев, В.Н. Теплотехнический справочник: т. 1 / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. – М., 1975. – 116 с.
  7. Письмо Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь №12-17/22-П «О сжигании деревянных шпал» от 27.02.2007 г. // Законодательство – Библиотека – Справочная информация [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: [www.iso14000.be/library/low/air](http://www.iso14000.be/library/low/air). – Дата доступа: 19.05.2015.
  8. Наумович, В.М. Сушка торфа и сушильные установки брикетных заводов / В.М. Наумович. – М.: Недра, 1971. – 279 с.
  9. Рукавный фильтр с импульсной регенерацией для очистки запыленных газов / Ю.В. Красовицкий, С.Ю. Панов, З.С. Касанов // Поиск патентов и изобретений, зарегистрированных в РФ и СССР / FindPatent/ru / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/243/2437710.html>. – Дата доступа: 19.05.2015.
  10. Высокопроизводительный очиститель воздуха SimPact 4T-R [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simatek.com/00002>. – Дата доступа: 17.03.2015.
- 

**Berezovsky N.I., Borisejko V.V.**

**The increase of compatibility of peats by using the advanced aspirating systems in their production technology**

*There are presented certain results of studying foreign experience concerning the optimization of further development of energy sources taking into account economic and ecological aspects. For increasing the compatibility of peats by lowering the cost, the authors propose to improve the basic technology of domestic manufacturers of fuel peats, which will considerably allow to reduce losses of electric power, water, finished high-quality raw products and also to reduce dust emissions into the environment.*

Поступила в редакцию 24.03.2015 г.

УДК 622.363.2.063.44(476)(047)

## СЕЛЕКТИВНАЯ ВЫЕМКА ПЛАСТОВ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО С ПОРОДНЫМИ ПРОСЛОЯМИ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ

Хлебко А.А., Шутин С.Г., Бакунович А.В., Морев А.Б. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь), Петровский А.Б., Барбиков Д.В. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь)

*В статье изложено предложение по совершенствованию селективной выемки калийных пластов с породными прослоями на Старобинском и Петриковском месторождениях.*

*Выполнены сравнительные расчеты технико-экономических показателей добычных участков при валовой выемке, селективной выемке существующим и предлагаемым комплексом.*

*Реализация предложения позволит существенно повысить производительность селективного комплекса за счет оснащения его двумя селективными комбайнами, расположенными на ставе забойного конвейера, и разделения лавы в средней части вентиляционным штреком, при этом существенно повышается эффективность селективной выемки и расширяется область ее применения.*

### Введение

Известны существенные преимущества селективной выемки калийных пластов с прослоями породы. Несмотря на длительный опыт внедрения селективного оборудования, технология селективной выемки на рудниках ОАО «Беларуськалий» [1] широкого распространения не получила из-за ряда существенных недостатков, главным из которых можно считать снижение производительности в сопоставимых условиях по сравнению с валовой выемкой.

Это объясняется, в основном, дополнительными операциями технологического цикла, связанными с выполнением закладочных работ.

Кроме того, получившие распространение селективные комбайны СЛ-500С обладают следующими принципиальными недостатками:

- комбайн не может выполнять концевую операцию по зарубке, и требуется лаву оборудовать дополнительно одношнековым комбайном типа СЛ-300Е для формирования ниши на концевом участке лавы. Наличие второго комбайна в лаве, предназначенного только для выполнения ниши (15-20 м), существенно ухудшает технико-экономические показатели добычного участка;

- по принятой технологии отработки забоя комбайном СЛ-500С галитовый слой разрушается, имея две обнаженные поверхности, что приводит к образованию крупных фракций («негабаритов»), для разрушения которых необходимо перед метателями устанавливать дробилки.

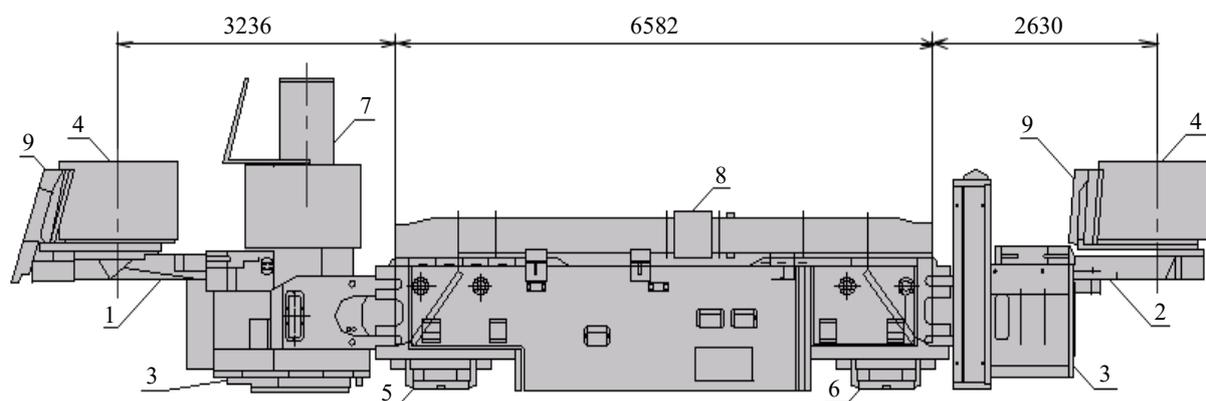
### Технология селективной выемки полезного ископаемого

Из-за низкой производительности, а также скорости ухода лавы в ряде случаев не представляется возможным обрабатывать панель одновременно селективными и ва-

ловыми лавами. Для существенного повышения производительности селективных лав предлагается новая технология, суть которой заключается в следующем.

В отличие от используемых селективных комплексов оборудования в составе селективного комбайна СЛ-500С и одношнекового комбайна для выполнения ниши в конце лавы СЛ-300Е предлагается использовать два селективных комбайна «Электра-700СЕЛ», а лаву разделить в средней части вентиляционным штреком.

Комбайн «Электра-700СЕЛ» показан на рисунке 1.



- 1 – рукоять с двумя шнеками; 2 – выдвижная рукоять; 3 – приводы шнеков;  
 4 – шнеки; 5, 6 – механизм подачи; 7 – выдвижной режущий орган;  
 8 – пылеотсасывающая установка; 9 – погрузочные щитки

**Рисунок 1 – Схема селективного комбайна «Электра-700СЕЛ»**

Техническая характеристика комбайна «Электра-700СЕЛ» приведена в таблице 1.

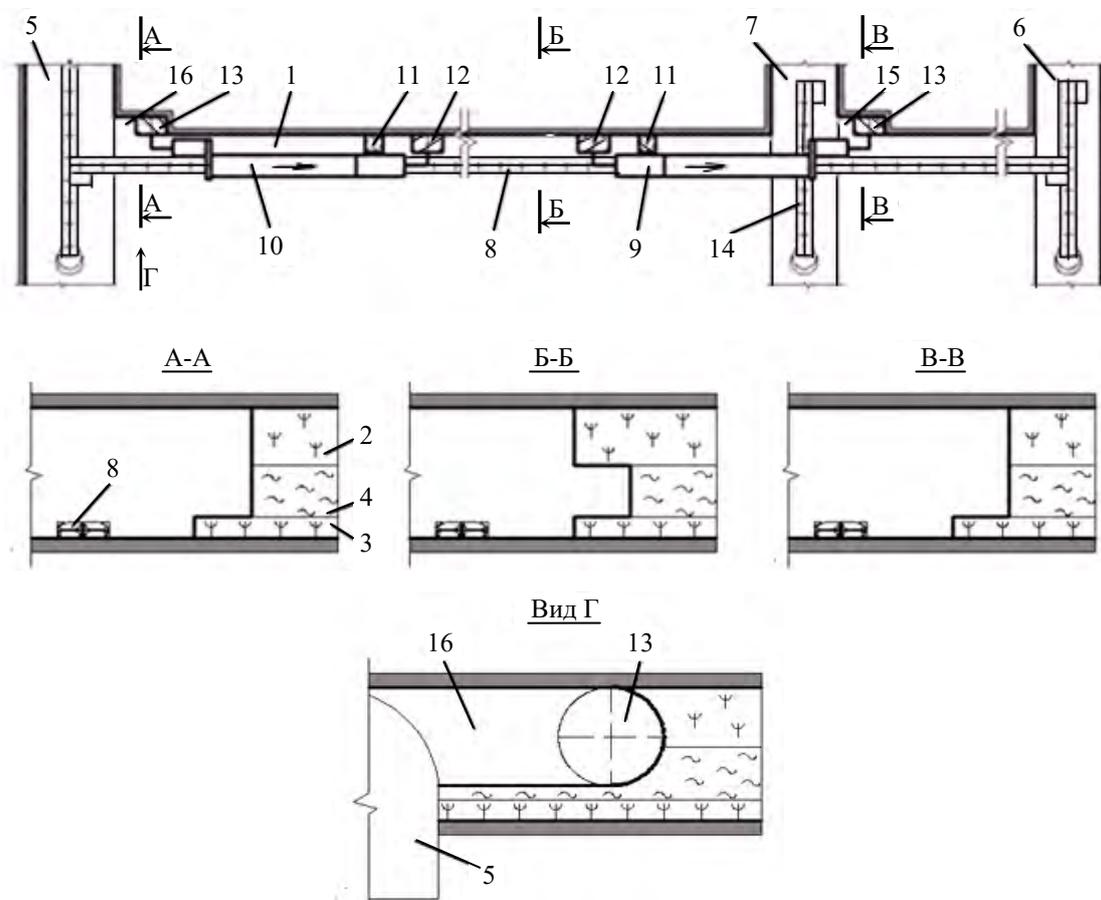
Таблица 1 – Техническая характеристика комбайна «Электра-700СЕЛ»

Наименование параметра, характеристики	Значение
1. Исполнительный орган, тип	трехшнековый
• диапазон регулирования по мощности пласта, мм	1800-2600
• диаметр шнеков, мм	1400, 1400, 600...900
2. Электродвигатель исполнительного органа, тип	EL-12G
• мощность, кВт	2×230
3. Механизм подачи, тип	электро-частотный
	0 – 60 – 120
• скорость подачи, м/мин	0-13
• тяговое усилие тока, кН	до 600
• мощность электродвигателя подачи, кВт	2×40

На рисунке 2 показана принципиальная технологическая схема и расположение оборудования для селективной выемки пласта полезного ископаемого.

Лаву 1 для селективной выемки пласта полезного ископаемого, состоящего из верхнего 2 и нижнего 3 слоев полезного ископаемого и расположенного между ними породного прослоя 4, готовят двумя бортовыми штреками 5 и 6 и средним вентиляционным штреком 7. На ставе 8 забойного конвейера устанавливают два селективных комбайна 9 и 10, каждый из которых оснащен выдвижным режущим шнеком 11

для выемки породного прослоя 4 и шнеками 12 и 13 для выемки слоев полезного ископаемого 2 и 3. Режущий шнек 13 является выдвижным.



**Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема и расположение оборудования для селективной выемки полезного ископаемого**

Селективные комбайны 9 и 10 устанавливают в лаве 1 выдвижными режущими шнеками 13 со стороны бортовых штреков 5 и 6. Для управления горным давлением и передвижки оборудования в лаве 1 предусматривается установка механизированной крепи (на рисунках не показана). Закладку выработанного пространства лавы 1 ведут известной закладочной установкой с роторными метателями 14.

Селективную выемку пласта полезного ископаемого осуществляют следующим образом.

Для зарубки (перехода на новую дорогу) селективных комбайнов 9 и 10 формируют примыкающие к штрекам 5 и 7 ниши 15 и 16 для расположения в них режущих шнеков при выемке полезного ископаемого выдвижными шнеками 13 комбайнов 9 и 10 (рисунок 2, Вид Г). Перемещают механизированную крепь и задвигают став забойного конвейера 8 на новую дорогу.

Для выемки слоев полезного ископаемого 2 и 3 комбайн 9 задвигают в нишу 15, а комбайн 10 задвигают в нишу 16. Выемку слоев 2 и 3 полезного ископаемого ведут комбайном 9 в направлении от среднего вентиляционного штрека 7 к бортовому штреку 6, комбайном 10 – в направлении от бортового штрека 5 к среднему вентиляционному штреку 7 (рисунок 3).

Для выемки породного прослая 4 выдвижной режущий шнек 11 задвигают в нишу 17, формируемую выдвижным режущим шнеком 13 комбайна 9 (рисунок 4).

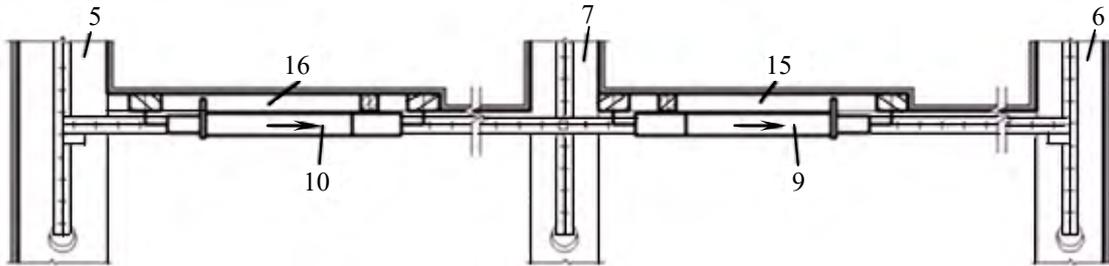
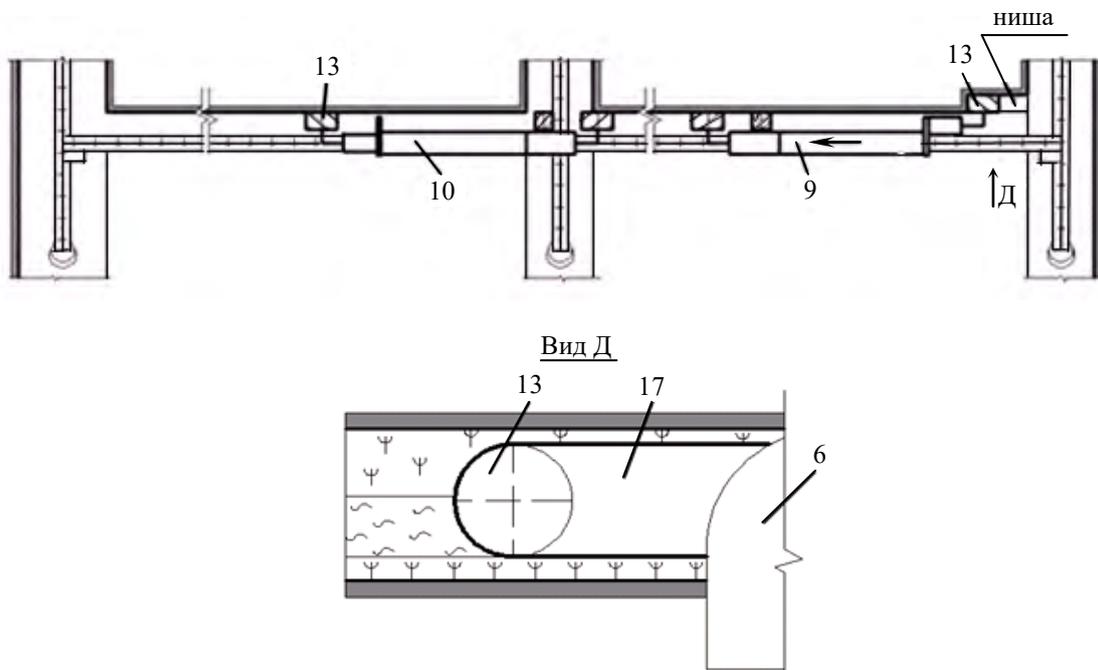


Рисунок 3 – Расположение оборудования при выемке слоев полезного ископаемого



17 – ниша для расположения в ней выдвижного шнека при выемке породного прослая

Рисунок 4 – Расположение оборудования при формировании ниши для выемки породного прослая

Выемку породного прослая 4 ведут комбайном 9 в направлении от бортового штрека 6 к среднему вентиляционному штреку 7, комбайном 10 в направлении от среднего вентиляционного штрека 7 к бортовому штреку 5 (рисунок 5). После чего цикл повторяется.

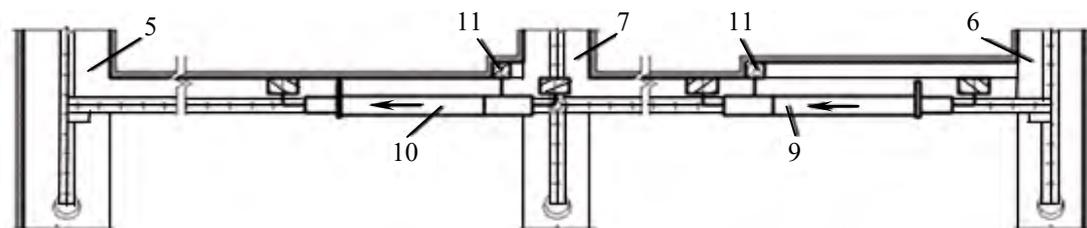


Рисунок 5 – Расположение оборудования при выемке породного прослая

Для оценки эффективности предложения выполнены сравнительные экономические расчеты для следующих вариантов обработки добычных участков:

- валовая выемка панели 1 Петриковского месторождения по слоям 2,2-3,3 верхней лавой (геологическая характеристика панели 1 приведена в таблице 2);
- селективная выемка комплексом оборудования с комбайнами СЛ-500С и СЛ-300Е;
- селективная выемка предлагаемым комплексом оборудования с двумя комбайнами Электра-700СЕЛ.

Таблица 2 – Краткая геологическая характеристика панели 1 Петриковского месторождения

Индекс слоя	Мощность слоя, м	Содержание КС1, %
4	0,7	27,5
3 – 4	1,05	1,5
3	0,85	43,0
2 – 3	0,75	3,0
2	0,3	40,0
1 – 2	0,95	4,0
1	1,35	28,0

Параметры лавы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для определения показателей селективной выемки

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Длина лавы, м	$L$	250,0
Средняя вынимаемая мощность, м	$m$	1,9
Ширина захвата режущего органа, м	$h$	0,8
Скорость подачи комбайна при добыче сильвинита, м/мин	$V_c$	2,1
Скорость подачи комбайна при добыче галита, м/мин	$V_r$	2,1

Результаты выполненных сравнительных расчетов эффективности предложений приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные технико-экономические показатели при обработке добычных участков по валовой технологии и селективной выемке существующим и предлагаемым комплексом

Наименование параметра	Значение		
	Добычной участка с существующим валовым комплексом	Добычной участка с существующим селективным комплексом	Добычной участка с предлагаемым селективным комплексом
1	2	3	4
Количество циклов в сутки	3,03	3,5	5,6
Продолжительность цикла, мин	357	278,3	174,46

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
Среднемесячная производительность по добыче сильвинита, т/мес.	44468	43025	65751,8
Годовая производительность по добыче сильвинита, т/год	533616	516300	789021,6
Среднемесячная производительность по закладке галита, т/мес.	-	24475	37565
Годовая производительность по закладке галита, т/год	-	293700	450780
Суммарная среднемесячная производительность, т/мес.	73500	67500	103316,8
Суммарная годовая производительность, т/год	882000	810000	1239801,6
Содержание KCl в руде при отработке слоев 2,2-3,3 верхней лавой, %	24	42	42
Содержание KCl в руде при отработке всей панели, %	27	34	34
Месячный уход лавы, м	74,4	70	112

### Заключение

Несмотря на существенные преимущества и длительный опыт внедрения селективной выемки калийных пластов с породными прослоями, технология селективной выемки на рудниках ОАО «Беларуськалий» в настоящее время широкого распространения не получила.

Основными недостатками селективной выемки можно считать снижение производительности в сопоставимых условиях по сравнению с валовой выемкой.

Для существенного повышения производительности селективных комплексов разработана технология ведения селективной выемки в лаве, оборудованной двумя селективными комбайнами, расположенными на ставе забойного конвейера. При этом лава разделена в средней части вентиляционным штреком.

Вместо применяемых в настоящее время селективных комплексов с селективным комбайном СЛ-500С и одношнековым комбайном СЛ-300Е предлагается использовать два более совершенных селективных комбайна типа «Электра-700СЕЛ». При этом, ориентировочная стоимость предлагаемого селективного комплекса увеличится на величину, равную разности в цене селективного комбайна и одношнекового комбайна.

В сравнении с размещением на панели двух селективных лав с действующими технологией и оборудованием, общая стоимость предлагаемого оборудования и подготовки участка (на единицу продукции) будет существенно ниже.

Выполнены сравнительные расчеты эффективности применения настоящего предложения путем сравнения технико-экономических показателей добычных участков

с применением предлагаемого селективного комплекса, валового комплекса, а также с существующим селективным комплексом, и установлено следующее:

- увеличение среднемесячной производительности лавы на 40,5 % по сравнению с валовым добычным участком, в том числе по сильвиниту – на 47,9 %;
- повышение годовой производительности лавы по сильвиниту на 52,8 % по сравнению с селективным добычным участком;
- повышение качества руды с 24 % KCL до 36-42 % KCL по сравнению с валовым добычным участком;
- среднемесячный уход лавы на 112 м/мес. позволит получить возможность работать совместно с нижней лавой по слою 1;
- складирование около 450000 тонн пустой породы в выработанном пространстве лавы. Это позволит существенно снизить финансовые средства, затрачиваемые при валовой выемке на транспортировку, подъем, обогащение и складирование породы.

Учитывая изложенное, можно утверждать, что в рассматриваемых условиях Старобинское и Петриковское месторождения наиболее целесообразно отрабатывать селективным способом с использованием настоящего предложения.

Для более глубокой проработки отдельных технологических решений и элементов оборудования научно-технические и опытно-конструкторские работы необходимо продолжать.

#### Список использованных источников

1. **Смычник, А.Д.** Разработка калийных месторождений / А.Д. Смычник, А.Б. Морев. – Минск: Интегралполиграф, 2012. – 400 с.

---

**Khlebko A.A., Shutin S.G., Bakunovich A.V., Morev A.B., Petrovsky A.B., Barbikov D.V.**

#### **Selective mining of mineral seams with intermediate rocks. Improvement of technology and equipment**

*The paper states a proposal for the improvement of selective mining of potash seams with intermediate rocks in the Starobin and Petrikov deposits.*

*Comparative calculations of technico-economical characteristics of mining district at complete extraction by the existing and proposed complexes are performed.*

*The implementation of proposal allows to increase the productivity of the selective complex by equipping it by two selective machines, located on the line of the face conveyor and by division of a longwall in its middle part by air roadway. Besides, the efficiency of selective mining considerably increases and the field of application expands.*

Поступила в редакцию 28.05.2015 г.

УДК 622.276.76:628.5(047)(476)

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕКУЩЕГО И КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА СКВАЖИН НА НЕФТЬ**

Чижик О.А. (УПНПиРС РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», г. Речица, Беларусь), Морзак Г.И. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*В статье отражена специфика обеспечения экологической безопасности нефтедобывающих производственных объектов, в частности, при производстве работ по текущему и капитальному ремонту скважин. Общий анализ воздействия данной деятельности на окружающую природную среду и выявление наиболее существенных экологических рисков деятельности позволяют предложить систему организационно-технических мероприятий, направленных на минимизацию воздействия, включающую в себя как общие поддерживающие мероприятия, так и инженерную модификацию существующих природоохранных сооружений – систему сбора флюида на околоустьевом пространстве и систему организации гидроизоляции шламового амбара.*

**Введение**

РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» – государственная нефтехимическая компания, осуществляющая геологоразведочные работы, разработку, добычу и реализацию нефти и газа. В 2015 г. «Белоруснефть» ведет добычу на 61 месторождении в Беларуси, 13 – в Венесуэле и 4 – в Российской Федерации.

На протяжении последних двух лет добыча нефти на территории Беларуси остается стабильной – на уровне 1 млн 645 тыс. тонн. Такой же показатель добычи запланирован на 2015 год, что является довольно сложной задачей для предприятия в связи с тем, что наиболее крупные месторождения уже вступили в завершающую стадию разработки, когда при высокой (68-86 %) степени выработки начальных запасов неуклонно нарастает обводненность, падают темпы отбора. Остаточные запасы переходят в категорию трудноизвлекаемых, которые уже составляют около 43 % сырьевой базы РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» [1]. Удерживать добычу нефти на стабильном уровне при постепенно истощающихся внутренних запасах удается за счет геолого-технических мероприятий и проведения ремонтно-восстановительных работ добывающих скважин. Данную деятельность в структуре предприятия осуществляет Управление по повышению нефтеотдачи пластов и ремонту скважин. Однако при ремонте скважин неизбежно возникают проблемы экологической безопасности, которые могут оказывать существенное воздействие на окружающую природную среду. Системный подход к экологической деятельности предприятия может позволить минимизировать данное воздействие. Важным положительным направлением для экологизации производства и обеспечения его экологической безопасности представляется оценка экологических и эколого-экономических рисков и управления ими посредством внедрения эколого-эффективных и экономически целесообразных мероприятий.

**Основная часть**

Ремонтно-восстановительные работы необходимы для нормального функционирования добывающих скважин, которое нарушается по различным причинам, что при-

водит либо к полному прекращению работы скважины, либо к существенному уменьшению ее дебита. Причины прекращения или снижения добычи могут быть самыми разнообразными – выход из строя подземного или наземного оборудования, изменения пластовых условий. Все ремонтные работы в зависимости от их характера и сложности разделяют на текущий и капитальный ремонты скважин, которые включают в себя комплекс сложных, многостадийных технологических операций, выполняемых на станках различной грузоподъемности. В цикл выполняемых операций входят работы по смене подземного оборудования, освоение скважин после строительства, выполнение геолого-технических мероприятий (различного вида работы, связанные с интенсификацией нефтяного притока, водоизоляционные работы, бурение бокового ствола и другие).

Общей чертой проведения ремонтных работ является их неотъемлемое воздействие на окружающую среду, которое не может быть предотвращено по ряду объективных причин:

- в ремонт принимаются заведомо неправильно функционирующие и аварийные скважины, не всегда известна причина поломки до начала производства работ, что влечет за собой большую вероятность возникновения внештатных ситуаций;
- принятая в ремонт скважина заполнена нефтью, выход которой возможен при производстве работ. Данная ситуация возникает в связи с необходимостью использования в качестве рабочей жидкости дегазированной нефти (с целью недопущения возникновения избыточной репрессии на пласт в условиях пониженного пластового давления);
- при поломке скважин оборудование и трубы, находящиеся в ней, загрязняются нефтью, парафином и шламом как внутри, так и снаружи и при подъеме их на устье загрязняют околоустьевое пространство;
- ремонты выполняются в максимально сжатые сроки, многие технологические процессы необходимо выполнять в непрерывном режиме, не смотря на возникающие непредвиденные ситуации;
- не все эксплуатируемое оборудование позволяет обеспечить предотвращение загрязнения окружающей среды и замкнутость цикла производства работ;
- территориальная разбросанность объектов ремонта скважин, работа в полевых условиях приводят к негативному воздействию на окружающую среду в связи с созданием необходимых условий работы оборудования и жизнедеятельности сотрудников;
- ремонт скважин – как направление в нефтедобывающей промышленности – является наименее изученным.

В итоге складывается ситуация, при которой необходимо обеспечить экологическую безопасность заведомо опасного для окружающей среды производственного процесса.

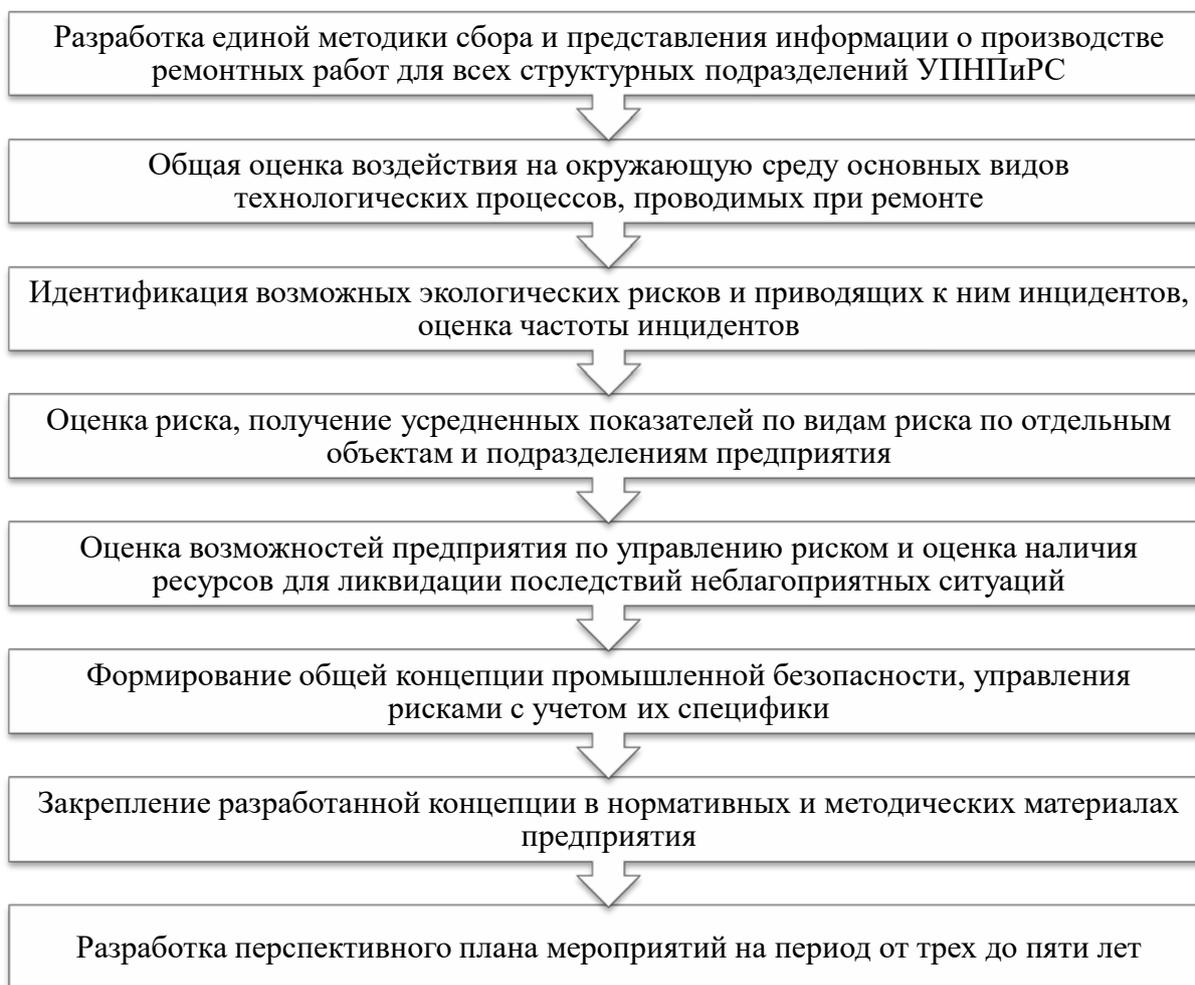
Обеспечение экологической безопасности нефтедобывающих производственных объектов РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», в частности, объектов Управления по повышению нефтеотдачи пластов и ремонту скважин, возможно посредством комплексной оценки экологических рисков, обусловленных техногенной деятельностью, и планированием экономических и инженерных мероприятий по минимизации воздействия на различные компоненты окружающей среды – то есть контроль и управление выявленными рисками.

Схему обеспечения экологической безопасности при производстве ремонтных работ можно представить в виде этапов, представленных на рисунке 1.

Отразим некоторые этапы данной схемы как составные части системы экологической безопасности.

Общие показатели воздействия на окружающую среду при производстве ремонтных работ в нефтедобывающей промышленности сводятся к качественно-

количественным характеристикам воздействия на атмосферный воздух и водные ресурсы, а также воздействия от образования отходов.



**Рисунок 1 – Схема обеспечения экологической безопасности при производстве ремонтных работ [2]**

При проведении ремонтно-восстановительных работ скважины предприятие оказывает воздействие на атмосферный воздух, выбрасывая загрязняющие вещества в атмосферный воздух от следующих источников:

- двигателей внутреннего сгорания установок для восстановления скважин методом бурения бокового ствола;
- двигателей для выработки электроэнергии;
- резервуаров хранения топлива.

Количество источников выделения загрязняющих веществ в атмосферный воздух зависит от типа установки повышенной грузоподъемности.

Все двигатели внутреннего сгорания работают на дизельном топливе. Отработавшие газы дизельных двигателей выбрасываются в атмосферу через выхлопные трубы, при этом выделяются следующие загрязняющие вещества: диоксид азота, бензапирен, диоксид серы, предельные углеводороды  $C_{12}-C_{19}$ , оксид углерода, черный углерод (сажа) [3].

В валовом отношении ежегодно от основной и вспомогательной деятельности образуется 250...300 тонн загрязняющих веществ [4].

Ежегодно на предприятии образуется 950...1050 тонн отходов различных классов опасности. Специфическим отходом от деятельности предприятия является пресный буровой шлам и отработанный буровой раствор, относящийся к категории «Прочие отходы добычи нефти, не вошедшие в группу IV Г», на который приходится до 50 % от общего количества образованных отходов [4].

При амбарном способе ремонта и восстановления скважин образующийся пресный буровой шлам и отработанный буровой раствор сбрасываются в шламовый амбар. При соответствии необходимых параметров отработанный буровой раствор вывозится на растворный узел либо на другую скважину для повторного использования. На территории скважины предусмотрен шламовый амбар объемом 100 м<sup>3</sup>.

Вода на технологические нужды на предприятии не потребляется, на хозяйственно-питьевые нужды – 2,8...3,0 тыс. м<sup>3</sup> ежегодно. Источников сброса сточных вод в водные объекты нет [4].

Описанное выше воздействие не дает полной картины, так как не имеет привязки к конкретным технологическим процессам и не отражает значимости воздействия. Поэтому воздействия необходимо также рассматривать и с точки зрения потенциальных экологических рисков для окружающей среды, обусловленных конкретной технологической деятельностью.

Выявленными рисками необходимо управлять. Управление рисками должно базироваться на результатах анализа и оценки риска. Экологические риски принято оценивать как вероятность наступления неблагоприятного, с точки зрения воздействия на окружающую среду, события (количественная мера опасности). В таком случае величина экологического риска будет выражена в долях единицы или в процентах вероятности. Для экономической оценки экологических рисков (определения эколого-экономического риска) используются показатели ущерба окружающей среде. При этом значение риска будет определяться произведением показателя вероятности неблагоприятного события и экономического ущерба от его наступления, а оценка риска выражается в денежных единицах. Понятие ущерба связывается с ухудшением состояния или даже гибелью объекта (элемента окружающей среды), которые характеризуются определенным размером потерь. В связи с этим принято все предприятия делить на три группы опасности для окружающей среды:

- функционирующие с риском, полностью приемлемым для окружающей среды;
- функционирующие с риском, приемлемым частично для окружающей среды;
- функционирующие с риском, полностью неприемлемым для окружающей среды [2].

Существует три основных метода оценки риска:

- анализ статистических данных по неблагоприятным событиям, имевшим место в прошлом;
- теоретический анализ структуры причинно-следственных связей процессов;
- экспертный подход.

Также существует целый ряд подходов и расчетных зависимостей, используемых в настоящее время в практике. Анализ показал, что среди методов оценки вероятности наступления неблагоприятных событий или экологических рисков наиболее известными и приемлемыми к условиям предприятия являются следующие:

- метод построения деревьев событий;
- метод «события-последствия»;
- метод деревьев отказов;
- метод индексов опасности.

В результате использования любого метода практическая реализация принципов управления рисками сводится к разбиению рисков на области чрезмерного, приемлемо-

го и пренебрежительного рисков, что и было выполнено в рассматриваемом производственном процессе – ремонте скважин на нефть. Количество потенциальных экологических рисков УПНПиРС сводится к нескольким десяткам, в связи с чем приведем только те риски, которые в результате разбиения шкалы рисков оказались в области чрезмерного или приемлемого. Сведем данные в таблицу.

Таблица – Экологические риски при производстве работ по ремонту скважин

Технологический процесс	Экологический риск	Воздействие на окружающую среду	Вероятность реализации
Капитальный ремонт скважин методом бурения второго ствола	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от ДВС (углерода оксид, азота диоксид, серы диоксид и т.д.)	Загрязнение атмосферного воздуха	приемлемая
	Отходы бурения (буровой шлам и глинистый буровой раствор, соленасыщенный буровой шлам и отработанный буровой раствор)	Загрязнение земель с возможным загрязнением подземных вод	чрезмерная
	Сброс сточных вод в накопители	Загрязнение земель с возможным загрязнением подземных вод	приемлемая
	Шумовое загрязнение	Воздействие производственных условий на здоровье человека	приемлемая
	Риск возникновения загрязнения почв	Загрязнение почв	приемлемая
Текущий ремонт скважин	Отходы производства (сорбенты отработанные волокнистые, грунт, загрязненный нефтью и другие виды нефтесодержащих отходов)	Загрязнение компонентов окружающей среды твердыми отходами, отправляемыми на захоронение на полигон ТКО	чрезмерная
	Риск возникновения загрязнения почв нефтью	Загрязнение почв	чрезмерная
Хранение химических реагентов и ГСМ	Риск возникновения загрязнения почв нефтепродуктами	Загрязнение почв	приемлемая
Работы с ГСМ, ЛКМ и другими горючими материалами	Риск возникновения чрезвычайных ситуаций и инцидентов, оказывающих вредное воздействие на окружающую среду (проливы ЛВЖ, риск возникновения возгорания)	Загрязнение почв, причинение вреда окружающей среде, а также жизни, здоровью и имуществу предприятия	приемлемая

Ранжирование риск-ситуаций позволяет выявить приоритетные мероприятия по предотвращению загрязнения окружающей среды и своевременность их финансирования. В результате риск-анализа в категорию «чрезмерных рисков» попали направления воздействия, связанные с образованием отходов сорбционного материала и нефте-

загрязненного песка, захоронения бурового шлама в амбарах, интенсивное загрязнение приустьевой площадки. Следовательно, они являются первоочередными для введения мероприятий по минимизации их воздействия.

При внедрении мероприятий необходимо также учитывать, что управление рисками относится к экономической категории, поскольку под ним понимается распределение затрат на снижение различных видов рисков, обеспечивающее достижение максимального уровня безопасности окружающей среды. При этом, в качестве одного из основных принципов управления рисками рассматривается принцип оправдываемости практической деятельности, при котором никакая деятельность не может быть оправдана, если выгода от нее для общества не превышает вызываемого ею ущерба. Соответственно, все предлагаемые мероприятия являются не только необходимыми с точки зрения охраны окружающей среды и снижения вероятности возникновения того или иного риска, но и экономически эффективными [5].

### Управление рисками

С целью управления экологическими рисками был предложен комплекс организационно-технических и инженерных мероприятий. Покажем некоторые мероприятия, которые позволят снизить воздействие на окружающую среду от выявленных рисков высокой степени опасности. Информацию предоставим в сравнительном описании по схеме «Существующая ситуация – предложенное мероприятие – эколого-экономическая результативность».

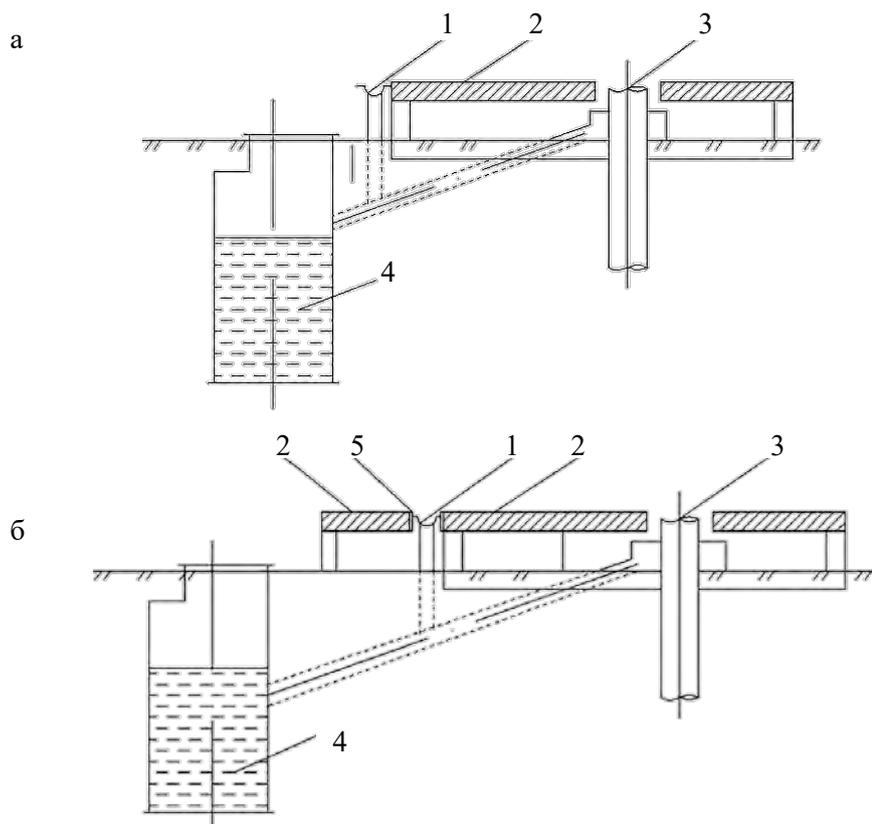
1. Удаление возникающих проливов нефтепродуктов с территории скважины на сегодняшний день происходит посредством использования волокнистых сорбентов и песка. В результате образуется большое количество отходов: сорбенты волокнистые отработанные, грунт загрязненный нефтью. Далее отходы направляются на захоронение на полигоне ТКО.

Для решения проблемы предложено использование материалов, обладающих как биодеструктивными, так и сорбционными свойствами, (согласно исследованиям лаборатории БелНИПИнефть на высоковязкой нефти эффективнее всего проявил действие препарат «Девороил»), проведение предварительной подсыпки территории в зонах максимального воздействия (приустьевая зона, края мостков для хранения трубного материала, места стыков и соединений запорных элементов емкостей с технологическими жидкостями и труб для их подачи) для своевременной сорбции нефти и нефтепродуктов и предупреждения их проникновения в грунтовые воды.

Эколого-экономическая эффективность достигается за счет предотвращения загрязнения окружающей среды (как на месте производства работ, так и от последующего захоронения на полигоне ТКО), снижения транспортных затрат – что в данной ситуации является ключевым в связи с территориальной разбросанностью производственных объектов, отсутствия выплат по экологическому налогу за захоронение отходов.

2. С целью предотвращения загрязнения приустьевой площадки она оборудована приемочным желобом по периметру и сливным колодцем. Данная конструкция не является герметичной, что приводит к сливу в колодец только до 30 % выброшенного флюида (нефти, нефтепродуктов, технологических жидкостей).

Предлагаемые мероприятия: при оборудовании площадки выкладывать дополнительный ряд плит по периметру устья, предусмотреть герметизацию стыков и угловых срезов железобетонных плит цементным раствором, что приведет к более эффективному сбору нефти в приемочный колодец по системе желобов, как показано на рисунке 2.



а – существующая практика; б – предложенные мероприятия;  
 1 – система приемочных желобов; 2 – железобетонная плита; 3 – устье скважины;  
 4 – приемочный колодец; 5 – герметичное соединение

**Рисунок 2 – Схема организации приустьевой площадки**

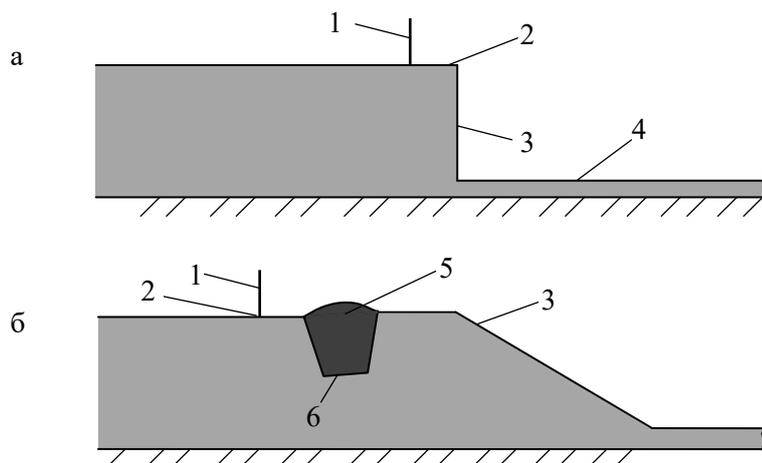
3. С целью предотвращения загрязнения земель от захоронения отходами бурения предусмотрены шламовые амбары. К амбару предъявляются следующие требования:

- гидроизоляция полиэтиленовой пленкой толщиной 200 мкм по периметру стен амбара;
- заливка глинистой пастой толщиной 60 мм дна амбара;
- заглубление амбара в грунт на ~1,5 м, обвалование на высоту ~0,45 м, обустройство временным ограждением высотой ~1,2 м.

Практика показывает, что существующая технология гидроизоляции шламового амбара приводит к постоянному его обрушению и необходимости восстановления. Постоянно загрязняется территория, прилегающая к амбару, при проведении разгрузки шламового контейнера.

Предлагаемые мероприятия для снижения воздействия риска заключаются в следующем. Конструктивная прочность шламового амбара и предотвращение фильтрации отходов бурения за его пределы должны обеспечиваться созданием на внутренней поверхности накопителя противофильтрационного экрана из синтетического нетканого материала с учетом изменения формы амбара и гидроизоляции амбара по периметру, как изображено на рисунке 3.

Экологическая эффективность достигается за счет увеличения прочности амбара, что защищает от обрушения, и предотвращения фильтрации отходов бурения за его пределы, экономическая – за счет уменьшения объема ручного труда по строительству и постоянному восстановлению амбара, отсутствие затрат на дополнительный завоз глинистой пасты.



а – существующая практика; б – предложенные мероприятия;  
 1 – дощатое ограждение; 2 – край крепления гидроизоляции; 3 – рулонный материал;  
 4 – глинистая паста; 5 – насыпной грунт; 6 – укрепление рулонного материала  
 с помощью штрабы в грунте

**Рисунок 3 – Схема строительства шламового амбара**

Инженерная модификация существующих природоохранных сооружений позволит снизить уровень экологического риска до приемлемого. Для поддержания деятельности предприятия в зоне пренебрежительно малого и приемлемого риска необходима непрерывная природоохранная деятельность, обеспечивающая комплексный подход к управлению всеми экологическими рисками предприятия, которая неотъемлемо включает в себя необходимость:

- осуществлять свою деятельность в соответствии с природоохранным законодательством Республики Беларусь;
- осуществлять учет экологических факторов при разработке новых технологических решений и проектов;
- применять энергосберегающие технологии, позволяющие уменьшать воздействие на окружающую среду;
- добиваться снижения образования отходов производства путем выбора малоотходных технологий и реализации организационных мероприятий с участием каждого работника коллектива;
- использовать современные технологии и оборудование для обезвреживания и использования отходов производства;
- совершенствовать технологические мероприятия по обезвреживанию отходов бурения с целью снижения их негативного воздействия на окружающую среду;
- осуществлять мониторинг производственной деятельности, изучение воздействия на окружающую среду процессов, выбросов, сбросов, отходов, связанных с производственной деятельностью;
- устанавливать конкретные экологические показатели производственной деятельности.

### **Выводы**

Обеспечить экологическую безопасность заведомо опасного для окружающей среды производственного процесса – проведения ремонтных работ скважин на нефть – возможно в случае обеспечения поэтапной и комплексной проработки экологических рисков предприятия.

Управление экологическими рисками должно базироваться на результатах анализа и оценки риска. Ранжирование риск-ситуаций позволяет выявить приоритетные мероприятия по предотвращению загрязнения окружающей среды и своевременность их финансирования.

Воздействие на окружающую среду от выявленных рисков высокой степени опасности может быть существенно снижено за счет проведения технических мероприятий: замены используемого сорбционного материала, реконструкции приустьевой площадки и шламового амбара.

Для поддержания деятельности предприятия в зоне пренебрежительно малого и приемлемого риска необходима непрерывная природоохранная деятельность по управлению всеми экологическими рисками предприятия.

### Список использованных источников

1. **Карабанов, А.К.** Проблемы освоения минерально-сырьевых ресурсов Беларуси / А.К. Карабанов / Географические науки в обеспечении стратегии устойчивого развития в условиях глобализации: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-28 окт. 2012 г. / БГУ; редкол.: И.И. Пирожник (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Изд. центр БГУ, 2012. – 362 с.

2. **Хаустов, А.П.** Охрана окружающей среды при добыче нефти / А.П. Хаустов, М.М. Редина. – М.: Дело, 2006. – 552 с.

3. Акт инвентаризации выбросов загрязняющих веществ УПНПиРС. – Гомель: Связьинформсервис, 2014. – 32 с.

4. Отчет о природоохранной деятельности УПНПиРС за 2014 год. – Речица: УПНПиРС, 2015. – 46 с.

5. **Дмитрук, В.И.** Оценка и приоритеты управления страховым риском на объектах нефтегазового комплекса / В.И. Дмитрук, С.Г. Миронюк, С.А. Гальченко // Управление рисками чрезвычайных ситуаций: материалы шестой Всероссийской науч.-практ. конф., Москва, 20-21 марта 2001 г. – М.: КРУК, 2001. – С. 318-321.

---

**Chizhik O.A., Morzak G.I.**

### **Environmental safety ensuring during the current repair and workover of oil wells**

*The article reflects environmental safety specificity of oil-producing industrial facilities, in particular in the production of works of current repair and workover of oil wells. The general analysis of the impact of these activities on the environment and the most significant environmental risk activities identification allows to offer a system of organizational and technical measures. These measures are focused on the environmental impact minimizing and include both general supportive measures and engineering modifications of existing environmental structures – collecting fluids system under wellhead space and sludge pit waterproofing system.*

Поступила в редакцию 06.07.2015 г.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.861:621.833

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ РУЧНОГО  
ПОДЪЕМНО-ТЯГОВОГО МЕХАНИЗМА**

Макаревич С.Д. (Научно-практический центр Могилевского областного УМЧС,  
г. Могилев, Беларусь)

*Статья посвящена вопросу разработки конструкции и методики определения коэффициента полезного действия ручного подъемно-тягового механизма, применяемого в качестве привода устройства для эвакуации людей и грузов из глубины при проведении аварийно-спасательных работ.*

**Введение**

Подъемно-тяговые устройства получили широкое распространение при проведении аварийно-спасательных работ. Потребность в данных устройствах растет, так как они используются при разборках завалов и разрушений, эвакуации людей с высоты и глубины, автоавариях и других чрезвычайных ситуациях. При применении прецессионного редуцирующего механизма в конструкции ручной лебедки аварийно-спасательного устройства для эвакуации людей и грузов из глубины массогабаритные параметры данных устройств будут в 1,5-2 раза меньше, чем данные параметры подъемно-тяговых устройств, смонтированных на базе известных механических передач (например, червячных), что в дальнейшем позволит расширить сферу возможного использования данных передач.

**Основная часть**

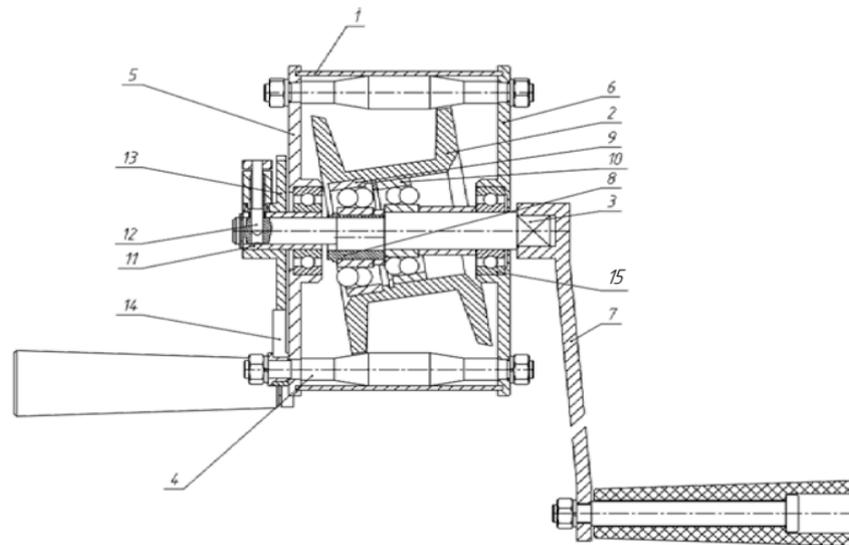
Разработка конструкции аварийно-спасательного устройства, отвечающего требованиям пониженных массогабаритных и стоимостных показателей, многофункциональности, является актуальной задачей. Обеспечение указанных требований во многом зависит от параметров редуцирующего механизма, используемого в приводе аварийно-спасательного подъемно-тягового устройства.

Разработка конструкции ручного подъемно-тягового механизма (РПТМ) с роликовой прецессионной передачей производилась в соответствии с техническими условиями ТУ ВУ 700192199.002-2008.

На рисунке 1 показана конструкция РПТМ со сферическими подшипниками в положении эксцентриковой втулки относительно приводного вала, когда ось этой втулки имеет максимальное значение эксцентриситета относительно оси вращения приводного вала. Это обеспечивает взаимодействие зубчатых венцов барабана с конической частью роликов.

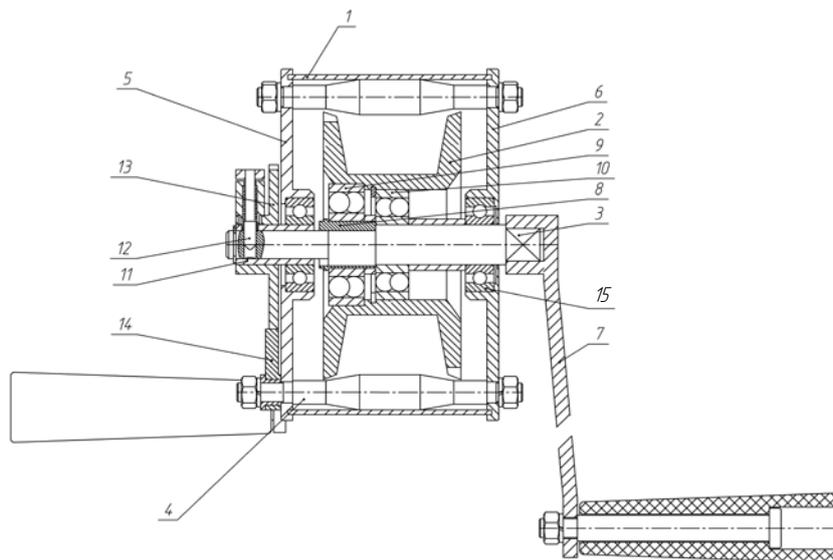
На рисунке 2 показана конструкция РПТМ со сферическими подшипниками во втором угловом положении эксцентриковой втулки, смещенном относительно первого положения на угол  $180^\circ$ , когда эксцентриситет ее оси относительно оси вращения при-

водного вала отсутствует, что обеспечивает выход зубчатых венцов реборд барабана из контактного взаимодействия с коническими роликами.



- 1 – защитная крышка корпуса; 2 – барабан; 3 – приводной вал; 4 – конические ролики;  
 5, 6 – крышки корпуса; 7 – рукоятка; 8 – эксцентриковая втулка;  
 9, 10 – сферические подшипники; 11 – втулка; 12 – стопорный стержень;  
 13 – храповое зубчатое колесо; 14 – собачка; 15 – подшипник

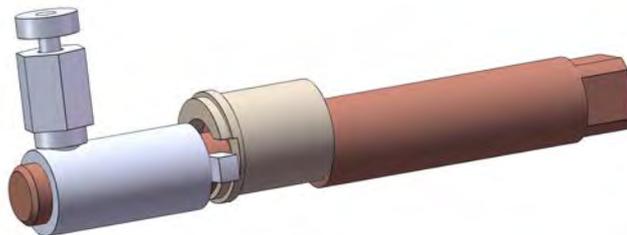
**Рисунок 1 – Конструкция РПТМ со сферическими подшипниками для аварийно-спасательного устройства в режиме обеспечения контактного взаимодействия зубчатых венцов барабана с конической частью роликов**



**Рисунок 2 – Конструкция РПТМ со сферическими подшипниками для аварийно-спасательного устройства в режиме обеспечения ускоренной размотки каната**

На рисунке 3 показан механизм для изменения режимов работы РПТМ. РПТМ работает следующим образом. Вращение от рукоятки 7 передается на приводной вал 3. В угловом положении эксцентриковой втулки 8 относительно приводного вала 3,

когда их эксцентриситеты суммируются, ось эксцентриковой втулки 8 имеет максимальное значение эксцентриситета относительно оси вращения приводного вала 3, что обеспечивает взаимодействие зубчатых венцов барабана 2 с конической частью роликов 4 (рисунок 1).



**Рисунок 3 – Механизм переключения режимов работы РПТМ**

Вращение приводного вала 3, благодаря наличию эксцентриситета оси эксцентриковой втулки 8 и двух сферических подшипников 9 и 10, преобразуется в колебательные движения барабана 2. Зубчатые венцы, выполненные на ребрах барабана 2, взаимодействуют с конической частью роликов 4. Благодаря данному взаимодействию барабан 2 получает вращательное движение вокруг своей оси, что приводит к намотке на поверхность барабана 2 закрепленного на нем каната. Для осуществления более плотной намотки каната на барабан 2 даже в случае, когда на канате нет натяжения, используется прижимное устройство. Т.е. канат, находящийся между подпружиненными планками с помощью упругого элемента (пружины), не имеет возможности находиться в свободном, т.е. в ненапрянутом, состоянии на барабане 2, что способствует более плотной укладке каната на барабане 2. Для предотвращения самопроизвольного разматывания каната используется храповой механизм. Приводной вал 3, благодаря закрепленному на нем храповому зубчатому колесу 13 и собачке 14, размещенной на корпусе крышки 5, имеет вращение только в направлении в сторону, обеспечивающую намотку каната на барабан 2. В случае необходимости опускания груза имеется возможность вывода собачки 14 из зацепления с храповым зубчатым колесом 13.

При необходимости ускоренной размотки каната с барабана 2 стопорный стержень 12 выводится из отверстия приводного вала 3 и осуществляется поворот на угол  $180^\circ$  дополнительной концентрично расположенной втулки 11. Благодаря наличию пазов на торце втулки 11 и наличию пазов на торце эксцентриковой втулки 8, осуществляется угловой поворот последней на эксцентриковой части приводного вала 3. Равенство эксцентриситетов эксцентриковой втулки 8 и эксцентриковой части приводного вала 3 и расположение их в противофазе обеспечивает отсутствие эксцентриситета наружной поверхности эксцентриковой втулки 8 относительно оси вращения приводного вала 3. Отсутствие эксцентриситета обеспечивает выход зубчатых венцов реборд барабана 2 с контактного взаимодействия с коническими роликами 4 (рисунок 2). Таким образом, барабан 2 выводится из зацепления, и намотанный на нем канат может быть ускоренно размотан.

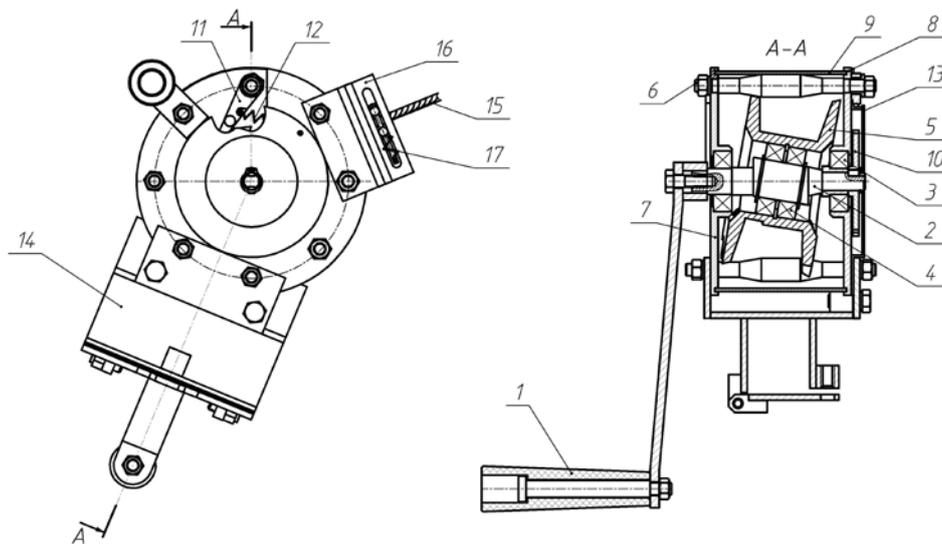
Зубья реборд барабана представляют собой профиль зубьев звездочки цепной передачи. Контакт зубьев происходит с конической частью роликов, угол конуса которой подбирается таким образом, чтобы обеспечить полное контактное зацепление. Использование высокотехнологичного профиля зубьев зубчатого венца барабана 2 позволяет снизить себестоимость изготовления РПТМ в целом.

На основе предложенной выше конструкции был изготовлен экспериментальный образец РПТМ, показанный на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Экспериментальный образец РПТМ со сферическими подшипниками**

Для упрощения конструкции РПТМ, а также снижения себестоимости ее изготовления была разработана модернизированная конструкция, в которой отсутствуют сферические подшипники и механизм ускоренной размотки каната. Предложенный конструктивный вариант показан на рисунке 5.



1 – рукоятка; 2 – приводной вал; 3, 4 – подшипники; 5 – сателлит-барабан; 6 – конические ролики; 7, 8 – крышки корпуса; 9 – корпус; 10 – храповое колесо; 11 – собачка; 12 – пружина; 13 – защитная крышка корпуса; 14 – крепление; 15 – канат; 16 – механизм; 17 – пружина

**Рисунок 5 – Конструкция РПТМ для аварийно-спасательного устройства**

Механизм работает следующим образом. Вращение от рукоятки 1 передается на приводной вал 2, вращающийся в подшипниках 3, и посредством подшипников 4 передает вращение на сателлит-барабан 5, который взаимодействует с роликами 6, установленными в крышках 7 и 8 и закрывающимися корпусом 9. Для предотвращения саморазматывания каната 15 на приводной вал 2 установлено храповое колесо 10, которое стопорится собачкой 11, подпружиненной пружиной 12. Храповой механизм закрыт крышкой 13. Механизм крепится к треноге при помощи крепления 14. Для предварительного натяга каната 15 используется механизм 16, подпружиненный пружиной 17.

Для проведения оценки коэффициента полезного действия (КПД) РПТМ с роликовым прецессионным зацеплением разработана методика, которая основана на методике определения потерь мощности в передачах с промежуточными телами качения [1].

Суммарные потери мощности определяются по следующей формуле:

$$L = L_z + \sum_{i=1}^n L_{pi}, \quad (1)$$

где  $L_z$  – потери мощности в зацеплении;

$L_{pi}$  – потери мощности в  $i$ -ом подшипнике, несущем ролик;

$n$  – количество нагруженных подшипников.

Принимаем  $n = 4$ , так как два ролика, контактирующие с зубчатым колесом, находятся в противофазе.

Предположим двупарное зацепление – зубья колеса контактируют с роликами в двух точках. Сила, действующая в зацеплении [2]:

$$R_{A2} = C_1 \cdot \frac{(\Phi_{K2} + T) \cdot z_{K2}}{\cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \left( \frac{R_p}{\cos \theta} - b \cdot \operatorname{tg} \theta \right)}, \quad (2)$$

где  $C_1$  – поправочный коэффициент ( $C_1 = 0,7$ );

$\Phi_{K2}$  – сила инерции груза;

$T$  – грузоподъемность;

$z_{K2}$  – координата, определяющая положение конца каната на барабане относительно оси его вращения;

$\alpha$  – угол зацепления;

$\beta$  – угол конусности роликов;

$R_p$  – радиус расположения конических роликов;

$b$  – расстояние от точки прецессии до зубчатого венца барабана РПТМ;

$\theta$  – угол наклона оси сателлита к оси входного вала.

Потери мощности в зацеплении:

$$L_z = 2 \cdot R_{A2} \cdot f \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot v_K, \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения ( $f = 0,1$ );

$v_K$  – скорость точки контакта.

Скорость точки контакта определяется по методике, приведенной в [3]. Предварительно ее можно оценить по формуле:

$$v_K = \omega_V \cdot R \cdot \cos \theta, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус делительной окружности колеса;

$\omega_V$  – угловая скорость вращения зубчатого колеса относительно собственной оси.

В [4, с. 64] приведена формула, по которой вычисляется мощность трения в подшипнике качения:

$$L_{pi} = P_i \cdot f_{\text{тр}} \cdot \pi \cdot d \cdot z, \quad (5)$$

где  $P_i$  – эквивалентная нагрузка, действующая на подшипник (по методике [2]);

$f_{\text{тр}}$  – приведенный коэффициент трения;

$d$  – диаметр отверстия в подшипнике;

$z$  – число тел качения, несущих нагрузку. Принимается как 25 % от общего числа тел качения в подшипнике с округлением до целого числа в меньшую сторону.

Эквивалентная нагрузка на подшипник оценивается по значениям действующих реакций. Эти реакции определяются по [5, формулы (4)-(13)]. С учетом поправочных коэффициентов данные реакции могут определяться также по [5, формулы (14)-(18)].

КПД механизма определится по формуле:

$$\eta = \frac{M_2 \cdot \omega_2}{M_2 \cdot \omega_2 + L}, \quad (6)$$

где  $M_2$  – крутящий момент, реализуемый на выходном валу РПТМ;

$\omega_2$  – угловая скорость выходного вала.

Подстановки значений в формулу (3) показали КПД, равный 0,89, что в целом, соответствует реальной картине. Сопоставимый КПД получен и средствами компьютерного моделирования.

### Выводы

Разработанная конструкция РПТМ позволила создать опытный образец данного механизма. Испытания подтвердили его работоспособность и грузоподъемность 500 кг. Также разработана методика определения КПД РПТМ.

Предложена структурная схема планетарной прецессионной передачи с коническими роликами, обеспечивающая повышение эксплуатационных характеристик лебедки подъемно-тягового аварийно-спасательного устройства грузоподъемностью 500 кг (снижение массы более чем в 2,5 раза, габаритных размеров – в 2 раза) по сравнению с выпускаемым серийно аналогом RUP 503 производства фирмы «Protekt» (Польша).

### Список использованных источников

1. **Лустенков, М.Е.** Кинематический метод определения КПД передач с промежуточными телами качения / М.Е. Лустенков // Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (Казахстан). – 2013. – № 4 (95). – С. 265-273.
2. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П.Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2012. – 209 с.
3. **Макаревич, С.Д.** Основы кинематического расчета прецессионного редуцирующего механизма лебедки для аварийно-спасательных устройств / С.Д. Макаревич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 1. – С. 51-58.
4. **Кошель, В.М.** Подшипники качения / В.М. Кошель. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 255 с.
5. **Макаревич, С.Д.** Расчет и проектирование прецессионного редуцирующего механизма с коническими роликами для привода подъемно-тягового аварийно-спасательного устройства: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / С.Д. Макаревич. – Могилев, 2011. – 26 с.

---

**Makarevich S.D.**

### **Development of the construction and the efficiency determination methods of the manual lifting and traction mechanisms**

*The article is devoted to the question of the development of the construction and the efficiency determination methods of the manual lifting and traction mechanisms used as a drive device for evacuation of people and freights from depth during carrying out of accident rescue operations.*

Поступила в редакцию 11.06.2015 г.

УДК 622.232:681.518

## НАДЕЖНОСТЬ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Прушак В.Я. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь), Волчек О.М. (УО «Барановичский государственный университет, г. Барановичи, Беларусь)

*Выполнен анализ числа отказов основных узлов проходческих комбайнов. Установлено, что наименее надежными являются: гидросистема, ходовая часть и привод. Показана необходимость разработки и применения современных технологий восстановления быстро изнашивающихся узлов комбайнов, их периодической диагностики и обновления парка технологического оборудования.*

### Введение

В последние годы в Республике Беларусь добывалось до 40 млн тонн руды, используемой для производства калийных удобрений. В 2014 году были добыты рекордные 46 млн тонн [1]. Существенная часть этого объема добывается с помощью проходческих комбайнов [2]. Поскольку комбайны эксплуатируются в весьма жестких условиях (высокие контактные нагрузки в подвижных сопряжениях, высокое давление в гидравлической системе, присутствие химически активной среды и абразива, ограниченные условия обслуживания узлов и т.д.), возникает потребность в статистике отказов, анализе этих данных и выявлении причин выхода из строя основных исполнительных узлов [2-4]. Такие исследования необходимы для предупреждения аварийных остановок проходческого комбайна, приводящих к нарушению непрерывности технологического процесса добычи калийной руды и существенным материальным затратам [3, 5]. Поэтому целью настоящей работы является выявление числа отказов основных узлов проходческих комбайнов различных типов, что позволит разработать систему мер предупреждения аварийных остановок [6].

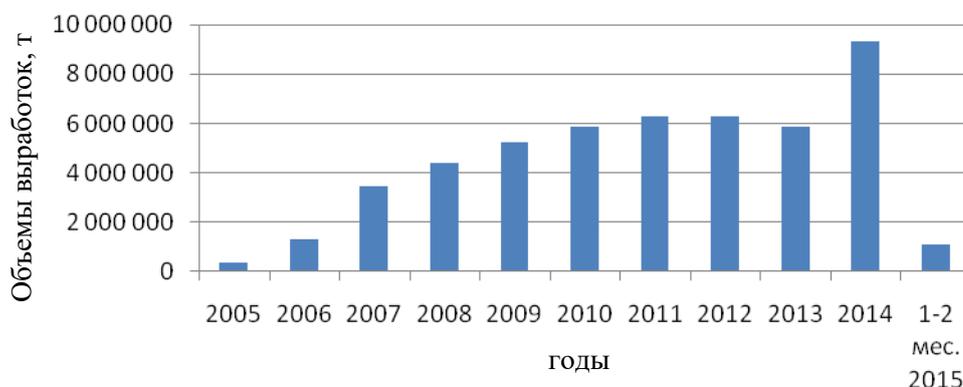
### Анализ надежности проходческих комбайнов

На рисунке 1 представлены данные об ежегодных объемах выработок на 5-ти рудоуправлениях (РУ) ОАО «Беларуськалий», обеспеченных проходческими комбайнами. Видно, что среднее значение этого показателя за последние 5 лет превышает 6 млн тонн руды в год. Отсюда следует необходимость обеспечения высокой надежности и долговечности всех систем проходческих комбайнов.

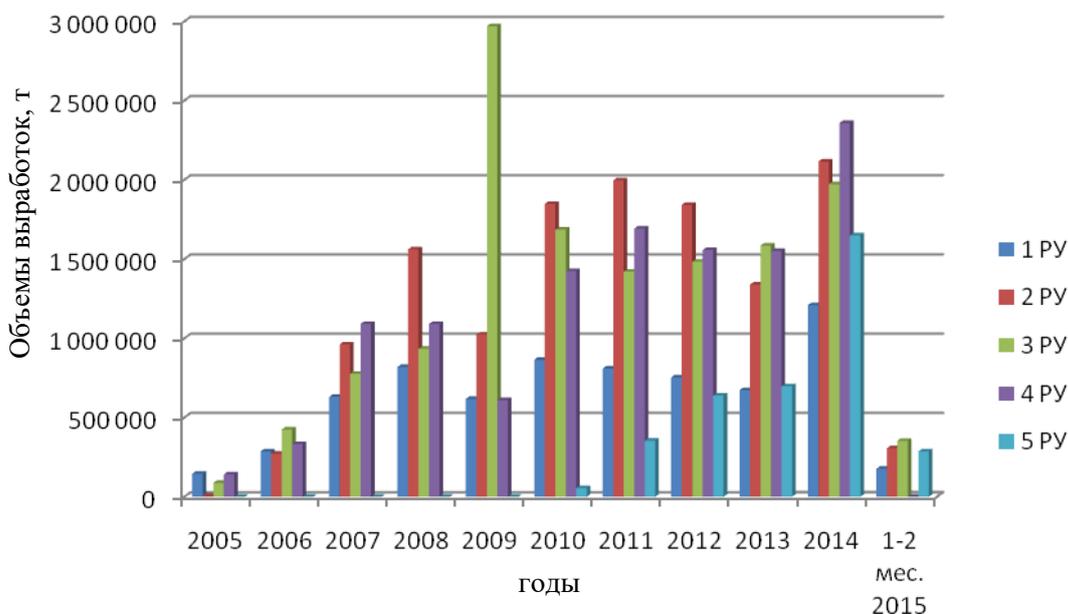
Основной вклад в объемы выработок вносят 2 РУ, 3 РУ и 4 РУ (рисунок 2). 1 РУ и 5 РУ обеспечивают меньшие объемы производства в период с 2010 по 2014 годы, что позволяет проводить анализ состояния проходческих комбайнов за 5 лет преимущественно без учета статистических данных по этим рудоуправлениям.

На всех рудниках эксплуатируются в основном проходческие комбайны марок ПКС-8М и КРП-3. Технические характеристики этих комбайнов представлены в таблице 1. Их можно отнести к машинам тяжелого типа, применение которых на калийных рудниках экономически более целесообразно. Необходимо отметить, что за рубежом наблюдается тенденция к отказу от легких машин массой до 40 т, установленная мощ-

ность привода исполнительного органа которых не превышает 100 кВт, и к использованию машин более тяжелого типа (75 т) с мощностью привода режущей головки до 300 кВт.



**Рисунок 1 – Суммарные годовые объемы выработок на 5-ти рудниках, обеспеченные проходческими комбайнами**



**Рисунок 2 – Объемы выработок за 2005-2015 годы, обеспеченные проходческими комбайнами**

Анализ показал, что комбайн КИД-220 применяется на рудниках редко, поэтому в дальнейшем основное внимание будем уделять комбайнам типа ПКС-8М и КРП-3. Проходческий комбайн марки ПКС-8М эксплуатировался во всех шахтах до 2011 года, а в настоящее время осуществляется поставка усовершенствованных комбайнов типа КРП-3. По выходным техническим характеристикам эти комбайны практически не различаются. Однако в конструкцию ряда узлов комбайна КРП-3 внесены изменения, позволяющие повысить их надежность и долговечность. Так, отличительной особенностью КРП-3 является то, что вместо массивного главного цилиндрического редуктора установлены два малогабаритных планетарных редуктора.

Наряду с техническими характеристиками важнейшим показателем, характеризующим эффективность работы проходческих комбайнов, является надежность работы основных узлов, так как для замены элемента конструкции приходится останавливать

процесс добычи и транспортировки руды, что влияет на себестоимость проходки и снижает производительность комбайна. Поэтому был выполнен анализ числа отказов основных узлов проходческих комбайнов за 5 лет их эксплуатации в ОАО «Беларуськалий» (таблица 2).

Таблица 1 – Технические характеристики проходческих комбайнов

Технические характеристики	Показатели комбайнов		
	ПКС-8М	КРП-3	КИД-220
Форма сечения выработки	арочная	арочная	арочная, прямоугольная, трапециевидная
Суммарная мощность электродвигателей, кВт	386,5	368,5	228,5
Мощность электродвигателя исполнительного органа, кВт	2×110	2×110	110
Производительность - при проходке, м/мин - при добыче, т/мин	0,28 4,5	0,28 4,7	- 1,65
Максимальное рабочее давление в гидросистеме, МПа	7,85	7,85	10
Максимальное сопротивление резанию соляных пород, МПа	450	450	450
Максимальное сечение выработки, м <sup>2</sup>	8	8	25
Угол наклона выработки, град	±15	±15	±15
Масса комбайна, т	58,8	58,5	50

Таблица 2 – Количество отказов основных узлов комбайнов за 5 лет эксплуатации

Узел	Общее число отказов		
	ПКС-8М	КРП-3	КИД-220
Отбойный орган	12	8	4
Привод	18	3	6
Ходовая часть	25	14	5
Конвейер	10	11	4
Гидросистема	35	40	20
Электрооборудование	14	12	20
Устройство смазочное	2	7	2
Станок буровой	10	8	6
Гидроцилиндры	12	15	5

Приведенные в таблице 2 данные свидетельствуют о том, что число отказов узлов усовершенствованного комбайна КРП-3 в целом значительно ниже, чем комбайна ПКС-8М. Такое преимущество КРП-3 особенно характерно для привода и ходовой части, выход из строя которых обусловлен в основном износоусталостными повреждения-

ми деталей. Несмотря на одинаковое максимальное рабочее давление менее надежной в данном комбайне является гидросистема. Следует отметить, что гидросистема требует совершенствования, т.к. она обеспечивает основную долю отказов комбайнов всех типов – 25 % (рисунок 3).



Рисунок 3 – Классификация отказов проходческих комбайнов

Значительная доля (18 %) отказов комбайнов обусловлена износом ходовой части, однако в усовершенствованной конструкции (КРП-3) этот показатель сократился почти вдвое. Судя по количеству отказов привода, для комбайна КРП-3 этот показатель перестал быть проблемным.

Для прогнозирования долговечности и производительности комбайнов в течение всего срока службы был выполнен выборочный анализ данных по годовым объемам выработки, обеспеченным комбайнами типа ПКС, в шахтах четырех рудоуправлений. Установлено, что для всех комбайнов характерна одного типа кинетическая кривая изменения объема выработки по годам (рисунок 4).

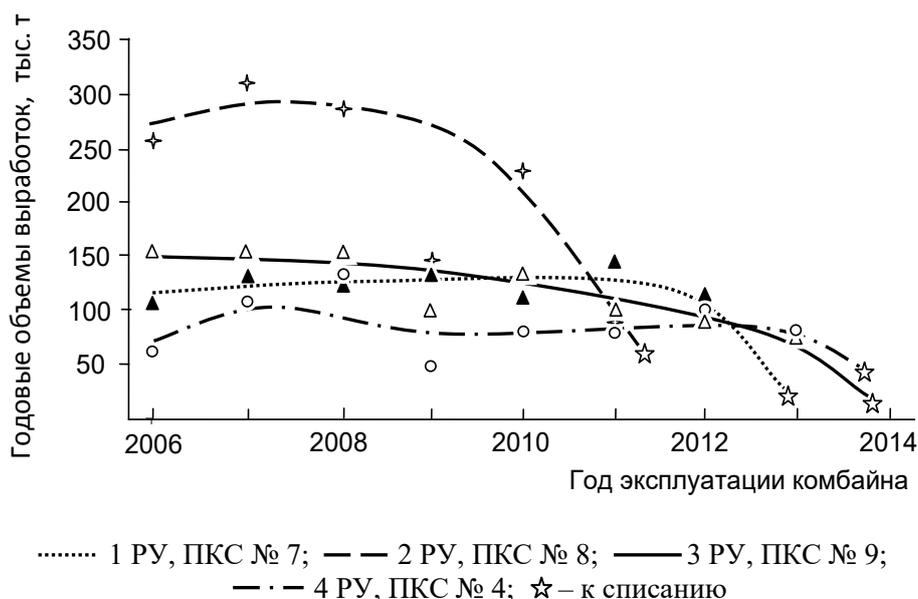


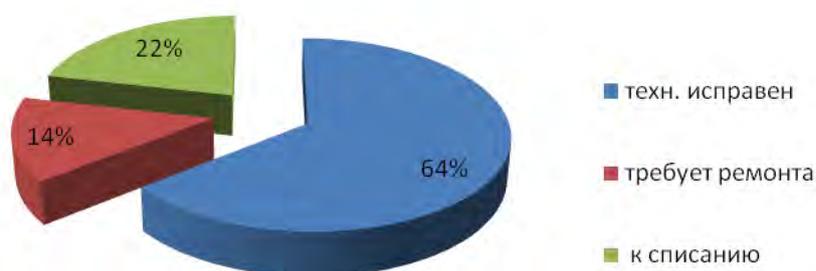
Рисунок 4 – Распределение объемов выработок комбайнами типа ПКС

В течение практически всего периода эксплуатации этот показатель для каждого из комбайнов находится вблизи некоторого среднего значения, а к концу срока их экс-

плуатации – снижается в 1,5-2 раза вследствие износа основных узлов. Уменьшается при этом и показатель надежности. Исключением является лишь комбайн ПКС № 9 (3 РУ), для которого заметное снижение производительности наблюдается раньше – после третьего года эксплуатации.

Описанная закономерность изменения объемов выработок с течением времени эксплуатации (длительный период стабильной работы с последующим быстрым снижением производительности) характерна для большинства комбайнов, эксплуатирующихся на рудниках ОАО «Беларуськалий». Отсюда следует, что для повышения среднего срока службы комбайнов весьма важно организовать проведение периодической диагностики состояния быстро изнашивающихся узлов, в том числе, с применением методов неразрушающего контроля.

Для обеспечения высокого уровня добычи калийной руды важно оценить техническое состояние добывающего оборудования. Так, по оценкам экспертных обследований свыше 14 % парка проходческих комбайнов, эксплуатирующихся на 2 РУ, требуют ремонта, причем большая доля отказов приходится на гидравлическую систему, ходовую часть и привод (рисунок 5). Почти 22 % проходческих комбайнов подлежат списанию по причине полного износа основных исполнительных механизмов. В исправном состоянии находится около 64 % оборудования. Изложенные результаты исследований указывают на необходимость разработки и применения современных технологий восстановления быстро изнашивающихся узлов комбайнов и обновления парка технологического оборудования.



**Рисунок 5 – Состояние парка проходческих комбайнов на 2 РУ**

### **Выводы**

1. Средний объем добычи калийной руды в ОАО «Беларуськалий» проходческими комбайнами за последние 5 лет превышает 6 млн тонн в год, что требует обеспечения их высокой надежности.

2. Наименее надежной в проходческих комбайнах является гидросистема – доля приходящихся на нее отказов составляет 25 %. До 18 % отказов обусловлено износом ходовой части, однако в совершенствованной конструкции (КРП-3) этот показатель сократился почти вдвое. Требуется совершенствования конструкция привода – около 13 % отказов.

3. Показана необходимость разработки и применения современных технологий восстановления быстро изнашивающихся узлов комбайнов, их периодической диагностики и обновления парка технологического оборудования.

4. Для более достоверных выводов по надежности проходческого комбайна марки КРП-3 необходимы дополнительные исследования, т.к. ввод их в эксплуатацию начался только в 2011 году.

#### Список использованных источников

1. **Гурина, Н.** 8 января 2015 года – «Беларуськалий» увеличил в 2014 г. производство калийных удобрений / Н. Гурина // Новости Беларуси [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://rusevik.ru/news/243418>. – Дата доступа: 10.08.2015.
2. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В.А. Данилов [и др.]; под ред. В.Я. Прушака. – Минск: Тэхналогія, 2010. – 175 с.
3. Опыт эксплуатации проходческих комбайнов избирательного действия (на примере шахт ОАО «СУЭК-Кузбасс») / В.И. Нестеров [и др.] // Горная техника. – 2012 – № 1.
4. Эксплуатация проходческого комбайна ПК-8М / К.А. Лоханин [и др.]. – 2-е изд. – М.: Недра, 1978. – 175 с.
5. Сайт компании «Китрейд» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://keytrade.by/rus/catalogue/17163/17165/17377/17359/17361>. – Дата доступа: 20.01.2015.
6. **Шор, Я.Б.** Таблицы для анализа и контроля надежности / Я.Б. Шор, Ф.И. Кузьмин. – М.: Советское радио, 1968. – 288 с.

---

#### Safety of road heading machines for mining of potash deposits

**Prushak V.Ya., Volchek O.M.**

*The failure number analysis of the main units of heading machines is performed. It is established that the least safety is the hydraulic system, the running gear and the drive. Stated the necessity of the development and usage of modern reconstruction technologies of rapidly wearing parts of the machines, their recurring diagnostics and replacement of processing equipment.*

Поступила в редакцию 17.08.2015 г.

УДК 621.65.01

**ВЛИЯНИЕ ЛОПАСТЕЙ НА ДАВЛЕНИЕ ОСЕВОГО НАГНЕТАТЕЛЯ**

Павлечко В.Н. (Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь), Казаченко Г.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*Проведен анализ сил, действующих на среду со стороны лопастей осевого нагнетателя. Предложены формулы для определения скоростей движения среды и давления, создаваемого колесом, в зависимости от угла наклона лопастей. Получены выражения для определения давления, создаваемого центробежной силой, и потерь давления на разгон среды перед колесом. Установлено, что известное уравнение Эйлера, определяющее давление радиального нагнетателя, отражает только его динамическую часть и не учитывает статическую составляющую. Приведены графические зависимости отношений скоростей среды к окружной скорости колеса и создаваемого давления от угла наклона лопастей при постоянном его значении по радиусу колеса. Максимальная осевая скорость движения среды достигается при угле наклона лопастей  $\beta = 45^\circ$ .*

**Введение**

В осевом нагнетателе передача энергии перемещаемой среде осуществляется лопастями, закрепленными на втулке. При этом лопасти перемещают среду в осевом и тангенциальном направлениях. Эта энергия может быть рассчитана по основному уравнению центробежной машины [1]

$$A_T = u(c_{2ua} - c_{1ua}) . \quad (1)$$

Для этой и последующих формул и рисунков условные обозначения расшифрованы в конце статьи.

В этом уравнении отражена только тангенциальная составляющая скорости движения среды, и не учитывается энергия, затрачиваемая на повышение давления среды в осевом направлении.

В работах [2, 3] проведен анализ сил воздействия колеса радиального нагнетателя на среду. Получены зависимости для определения динамического и статического давлений, которые создаются при вращении лопастей. Кроме того, рассмотрена также центробежная сила, которая создает часть статического давления. Определено, что известное уравнение Эйлера отражает только динамическую часть общего давления, создаваемого радиальным нагнетателем, и не учитывает его статическую составляющую. В настоящей работе проводится анализ влияния лопастей осевого нагнетателя по аналогии с влиянием лопастей радиального нагнетателя.

**Результаты исследований**

Рассмотрим отдельную лопасть, консольно закрепленную на втулке под углом  $\beta$  к плоскости вращения (рисунок 1). Втулка с лопастью вращаются с угловой скоростью  $\omega$ . В первом приближении предполагаем лопасть плоской, имеющей одинаковую ширину  $b$  по радиусу, и пренебрегаем трением среды о конструктивные элементы нагнетателя. Среда перед нагнетателем движется только в осевом направлении без вращения

относительно оси вращения. Выделим на лопасти элементарную площадку  $b \cdot dr$  на расстоянии  $r$  от оси вращения. При вращении лопасти элементарная площадка движется со скоростью  $u$  и действует на среду с силой  $dF$ , направленной перпендикулярно плоскости лопасти (рисунок 2). Эту силу представим в виде двух составляющих:  $dF_u$ , действующую в направлении окружной скорости, и  $dF_a$ , направленную вдоль оси вращения. Сила воздействия лопасти на среду пропорциональна площади миделевого сечения и квадрату скорости движения. Применительно к элементарной площадке упомянутые силы равны соответственно

$$dF = \rho b dr u^2; \tag{2}$$

$$dF_u = \rho b dr u^2 \sin \beta; \tag{3}$$

$$dF_a = \rho b dr u^2 \cos \beta, \tag{4}$$

где  $\beta$  – угол наклона лопастей.

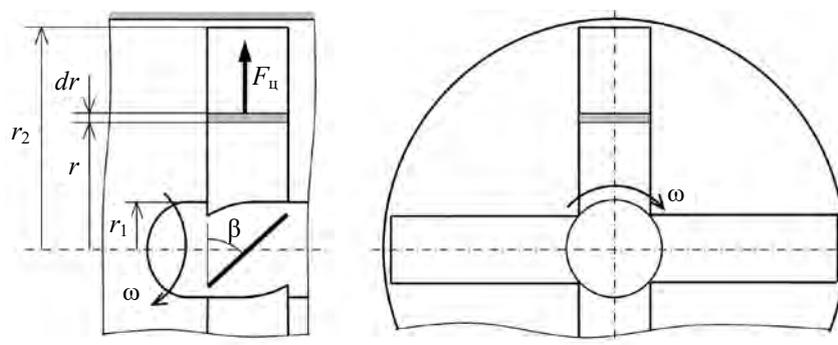


Рисунок 1 – Схема четырехлопастной осевой машины

Под действием этих сил среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, со скоростью  $c$ , в тангенциальном направлении –  $c_u$ , в осевом направлении –  $c_a$  (рисунок 3). Скорость движения среды  $c$  является геометрической суммой скоростей  $c_u$  и  $c_a$ , а с другой стороны – также геометрической суммой окружной скорости колеса  $u$  и относительной скорости среды  $w$ .

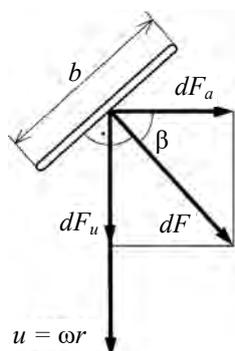


Рисунок 2 – Силы воздействия элементарной площадки лопасти на среду

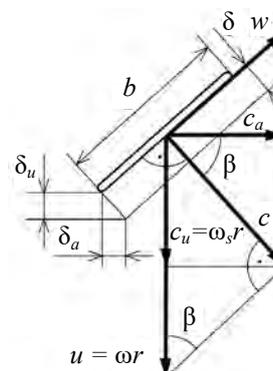


Рисунок 3 – Скорости движения элементарного объема среды

Приведенные на рисунке 3 скорости геометрически взаимосвязаны. Из прямоугольника, образованного векторами скоростей  $c_a$  и  $c_u$ , вытекает

$$c = u \sin \beta; \quad (5)$$

$$c_u = u \sin^2 \beta; \quad (6)$$

$$c_a = c \cos \beta = u \sin \beta \cdot \cos \beta. \quad (7)$$

Из параллелограмма, образованного векторами скоростей  $w$  и  $u$ , следует

$$w = c \frac{\cos \beta}{\sin \beta} = u \cos \beta. \quad (8)$$

Угловые скорости вращения колеса и среды выражаются зависимостями соответственно

$$\omega = \frac{u}{r}; \quad \omega_s = \frac{c_u}{r}. \quad (9)$$

Определим давление, создаваемое при вращении лопасти. Примем, что за промежуток времени  $dt$  элементарная площадка  $b \cdot dr$  перемещается со скоростью  $u$  на расстояние  $\delta_u = \delta \sin \beta$  (рисунок 3). Этот промежуток равен

$$dt = \frac{\delta \sin \beta}{u}. \quad (10)$$

За это время среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, в направлении окружной скорости и в осевом направлении на путь, который с учетом (5)-(7) соответственно равен

$$ds = c dt = \delta \sin^2 \beta; \quad (11)$$

$$ds_u = c_u dt = \delta \sin^3 \beta; \quad (12)$$

$$ds_a = c_a dt = \delta \sin^2 \beta \cos \beta. \quad (13)$$

Энергия, сообщаемая среде лопастями в перечисленных направлениях, равна произведению силы на путь перемещения среды и с учетом (11) определяется соответствующими выражениями

$$dA = dF ds = \rho b dr ds u^2; \quad (14)$$

$$dA_u = dF_u ds_u = \rho b dr ds u^2 \sin^2 \beta; \quad (15)$$

$$dA_a = dF_a ds_a = \rho b dr ds u^2 \cos^2 \beta. \quad (16)$$

Создаваемое лопастью давление равно удельной работе, отнесенной к единице элементарного объема среды, равного  $dV = b \cdot dr \cdot ds$ . Давление, создаваемое лопастью в указанных выше направлениях, выражается соответственно зависимостями

$$P = \frac{dA}{dV} = \rho \left| u^2 \right|_{r_1}^{r_2}; \quad (17)$$

$$P_u = \frac{dA_u}{dV} = \rho \left| u^2 \right|_{r_1}^{r_2} \sin^2 \beta; \quad (18)$$

$$P_a = \frac{dA_a}{dV} = \rho \left| u^2 \right|_{r_1}^{r_2} \cos^2 \beta. \quad (19)$$

При подстановке предельных значений скоростей с учетом выражения (6) формулы (17)-(19) преобразуются к виду

$$P = \rho \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{\sin^2 \beta}; \quad (20)$$

$$P_u = \rho (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}); \quad (21)$$

$$P_a = \rho (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) \cos^2 \beta. \quad (22)$$

В отличие от уравнения (1) в формулах (20)-(22) учитываются статическое и динамическое давления, создаваемые лопастями, а также изменение давления по радиусу лопасти.

При закручивании среды возникает центробежная сила, равная произведению элементарной массы среды  $dm = \rho b ds dr$  на ускорение  $a = \omega_s^2 r$

$$dF_{ц} = dm \cdot a = \rho b dr ds \omega_s^2 r. \quad (23)$$

Энергия, сообщаемая среде центробежной силой на пути  $dr$ , перемещения элементарного объема, составляет

$$dA_{ц} = dF_{ц} dr = \rho b dr ds \omega_s^2 r dr. \quad (24)$$

Давление, создаваемое центробежной силой на пути перемещения  $dr$ ,

$$dP'_{ц} = \frac{dA_{ц}}{dV} = \rho \omega_s^2 r dr, \quad (25)$$

а на пути перемещения среды от  $r_1$  до  $r_2$ ,

$$P_{ц} = \int_{r_1}^{r_2} \rho \omega_s^2 r dr = \frac{\rho}{2} (c_{2u}^2 - c_{1u}^2). \quad (26)$$

С другой стороны, работа центробежной силы может быть представлена формулой [4]

$$A_{ц} = \frac{m}{2} (c_{2ц}^2 - c_{1ц}^2),$$

а удельная работа, отнесенная к единице объема среды, выражает собой давление, создаваемое центробежной силой:

$$P_{ц} = \frac{\rho}{2} (c_{2ц}^2 - c_{1ц}^2). \quad (27)$$

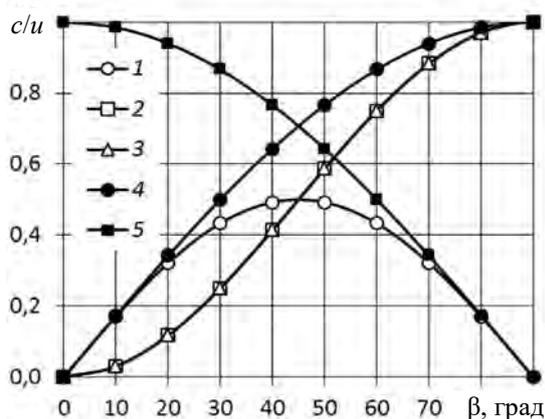
Сравнение формул (26) и (27) показывает равенство скоростей движения среды в радиальном и тангенциальном направлениях

$$c_{2u} = c_{2ц}; \quad c_{1u} = c_{1ц}. \quad (28)$$

Выражение для определения текущего давления, создаваемого центробежной силой, с учетом (6) и (28) имеет вид

$$P_{ц} = \frac{\rho}{2} u^2 \sin^4 \beta. \quad (29)$$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (5)-(8) и (28) к окружной скорости лопасти от угла наклона  $\beta$  приведены на рисунке 4.



1 –  $c_a/u$ ; 2 –  $c_u/u$ ; 3 –  $c_{\text{ц}}/u$ ; 4 –  $c/u$ ; 5 –  $w/u$   
**Рисунок 4 – Зависимость отношения скоростей от угла наклона лопастей**

ной из основных задач осевого нагнетателя является достижение максимального расхода среды, то угол наклона лопастей не должен превышать  $45^\circ$ . Увеличение скорости  $c_u$  при возрастании угла  $\beta$  более  $45^\circ$  несколько повышает расход среды и давление осевого нагнетателя, но требует дополнительных спрямляющих устройств и сопряжено с большими потерями энергии на трение.

Обычно среда забирается из некоторого объема, в котором она при его больших размерах практически неподвижна. При прохождении через нагнетатель несжимаемой среды (жидкости) или при сравнительно небольшом повышении давления (например, в вентиляторе) ее плотность практически не изменяется. Для таких случаев допустимо равенство объемного расхода среды и, соответственно, осевых скоростей ее движения на входе в нагнетатель и выходе из него. Для разгона среды до скорости  $c_a$ , с которой она проходит через нагнетатель, необходимо затратить определенную энергию (без учета потерь энергии на преодоление местных сопротивлений) и, соответственно, вычесть его из общего давления, сообщаемого лопастями среде. Эти потери выражаются зависимостью

$$P_{\text{ск}} = \frac{\rho}{2} c_a^2. \quad (30)$$

Подставим выражение осевой скорости  $c_a$  из (7) в (30)

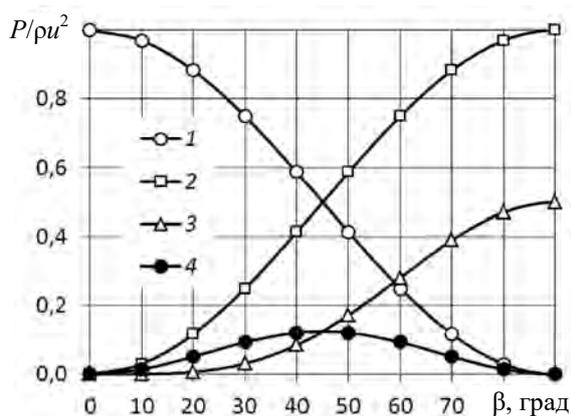
$$P_{\text{ск}} = \frac{\rho}{2} u^2 \sin^2 \beta \cos^2 \beta. \quad (31)$$

Графическое изображение давлений, развиваемых осевым нагнетателем, в соответствии с формулами (18), (19), (29) и (31) приведено на рисунке 5. При этом принято, что закручивание потока перед лопастями отсутствует.

При увеличении угла наклона лопастей давление в осевом направлении непрерывно снижается, в тангенциальном направлении – возрастает. Давление, создаваемое центробежной силой, заметно меньше давления в тангенциальном направлении и достигает половины его величины при  $\beta = 90^\circ$ . При угле наклона лопастей  $45^\circ$   $P_u = P_a$ , а  $P_{\text{ск}}$  достигает своего максимального значения, которое значительно меньше двух предыдущих.

Полученные формулы отражают теоретические аспекты работы осевого нагнетателя и справедливы при отсутствии потерь энергии на трение.

При увеличении угла наклона лопастей отношение  $c_a/u$  первоначально возрастает, достигает максимума при  $\beta = 45^\circ$  и затем снижается до нуля. Следовательно, для достижения высоких осевых скоростей движения среды целесообразно принимать значения  $\beta \approx 45^\circ$ . Отношения  $c_u/u = c_{\text{ц}}/u$  при  $\beta < 20^\circ$  возрастают менее значительно, чем отношение  $c/u$ , а при дальнейшем увеличении угла – более существенно. Обратная тенденция наблюдается при возрастании этих зависимостей в диапазоне  $\beta = 70-90^\circ$ . Отношение скоростей  $w/u$  при увеличении угла наклона лопастей непрерывно снижается. Поскольку од-



1 –  $P_a/\rho u^2$ ; 2 –  $P_u/\rho u^2$ ; 3 –  $P_{\text{ц}}/\rho u^2$ ; 4 –  $P_{\text{ск}}/\rho u^2$

**Рисунок 5 – Зависимость давлений осевого нагнетателя от угла наклона лопастей**

При небольшом изменении скорости  $c_a$  или при ее постоянстве сила  $F_a$  расходуется, в основном, на повышение давления среды, т.е. она создает статическое давление  $P_a$ . Сила  $F_u$  значительно изменяет величину скорости движения среды в тангенциальном направлении и создает тем самым динамическое давление  $P_u$ . Сила  $F_{\text{ц}}$  также как и сила  $F_u$  движет среду в направлении, перпендикулярном осевой скорости, но в отличие от нее это движение не влияет на давление, создаваемое осевым нагнетателем. Наиболее рационально радиальное движение среды сказывается в радиальном нагнетателе и частично – в диагональном, но

в осевой машине рассеивается и переходит в тепло.

Анализ формул (5)-(8) показывает, что текущие скорости движения среды пропорциональны окружной скорости колеса, т.е. его радиусу. Следовательно, на периферии скорости движения среды больше, чем возле втулки. Создаваемые осевым нагнетателем давления в соответствии с выражениями (20)-(22), (29) и (31) пропорциональны квадрату радиуса колеса. Значительно большее давление на периферии может привести к тому, что среда из этой области может перетекать к оси вращения, в область малого давления. Частично этому препятствует центробежная сила. Но не исключен также вариант движения среды вблизи втулки вдоль оси в обратном направлении (справа налево в соответствии с рисунком 1). Для устранения этого необходимо сближать значения предельных скоростей и давлений по радиусу колеса путем увеличения радиуса втулки  $r_1$  или уменьшать угол наклона лопастей по мере увеличения радиуса.

### Выводы

Максимальная осевая скорость движения среды достигается при угле наклона лопастей  $\beta = 45^\circ$ , и для получения максимального расхода среды через нагнетатель целесообразен угол наклона лопастей, не превышающий этого значения. Увеличение этого угла сверх указанного значения повышает тангенциальную скорость среды, но требует спрямляющих лопастей и сопряжено с потерями энергии на трение. Для предотвращения обратного тока среды вдоль оси вблизи втулки целесообразно сближать значения радиусов  $r_1$  и  $r_2$  или уменьшать угол наклона лопастей с увеличением радиуса.

### Список использованных источников

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Павлечко, В.Н. К вопросу о теоретическом давлении радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // ИФЖ. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1448-1454.
3. Павлечко, В.Н. Влияние угла наклона лопастей на давление радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // Химическая промышленность. – 2014. – Т. 91, № 5. – С. 252-258.

4. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики: в 2 ч. / А.А. Яблонский, В.М. Никифорова // Часть I: Статика, кинематика. – М.: Высшая школа, 1966. – 439 с.

#### Условные обозначения

$A$  – работа, Дж;  
 $b$  – ширина лопасти, м;  
 $\beta$  – угол между плоскостью лопасти и направлением, обратным окружной скорости, град;  
 $dV$  – элементарный объем среды, м<sup>3</sup>;  
 $c$  – скорость движения среды, м/с;  
 $F$  – сила, Н;  
 $\delta, s$  – линейные размеры, м;  
 $m$  – масса среды, кг;  
 $P$  – давление, Па;  
 $t$  – время, с;  
 $r$  – радиус рабочего колеса, м;  
 $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $u$  – окружная скорость колеса, м/с;  
 $w$  – относительная скорость среды, м/с;  
 $\omega$  – угловая скорость, рад/с.

#### Индексы:

$a$  – осевой, аксиальный;  
 $r$  – радиальный;  
 $s$  – поток (stream), среда;  
 $t$  – теоретический;  
 $u$  – тангенциальный;  
 $\psi$  – центробежный;  
 1 – вход в межлопастное пространство;  
 2 – выход из межлопастного пространства.

---

**Pavlechko V.N., Kazachenko G.V.**

#### **Effect of blades on pressure produced by an axial blower**

*The forces exerted on medium by blades of an axial blower are analyzed. The equations for calculation of speed of the medium and pressure created by the wheel based on the blade angle were derived. The equations were derived for pressure created by the centrifugal force and for pressure drop due to acceleration of the medium in front of the wheel. It was found that the well-known Euler equation describing pressure created by the radial blower considers only its dynamic part and does not consider the static component. The graphs demonstrating the speed of the medium as a function of radial speed of the wheel and the pressure created as a function of the blade angle are reported. The maximum axial speed of the medium is reached at the blade angle equal to 45°.*

Поступила в редакцию 03.06.2015 г.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УДК 621.74:669.13

**ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
ХРОМИСТЫХ ЧУГУНОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ**

Барановский К.Э., Урбанович Н.И., Басалай И.А., Розенберг Е.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Ильюшенко В.М., Дувалов П.Ю. («Институт технологии металлов» Национальная академия наук Беларуси, г. Могилев, Беларусь)

*В статье представлены результаты испытаний на износостойкость хромистых чугунов литых в земляные и металлические формы. Показано, что увеличение износостойкости и механических свойств чугунов возможно за счет использования литья в металлические формы и применения в качестве рабочих поверхностей деталей нижних частей отливок.*

**Введение**

Изучение абразивной износостойкости хромистых чугунов представляет практический интерес. Наиболее объективная информация об износе различных материалов может быть получена только при испытаниях в реальных условиях эксплуатации. В лабораторных условиях точно воспроизвести разнообразие факторов, действующих на изнашиваемую деталь, сложно. Тем не менее, результаты лабораторных испытаний позволяют сравнивать износостойкость хромистых чугунов между собой. Если последовательность расположения материалов по величине износа при лабораторных испытаниях и в реальных условиях их эксплуатации сохраняется, то можно считать, что избранная методика испытаний может использоваться для оценки износостойкости.

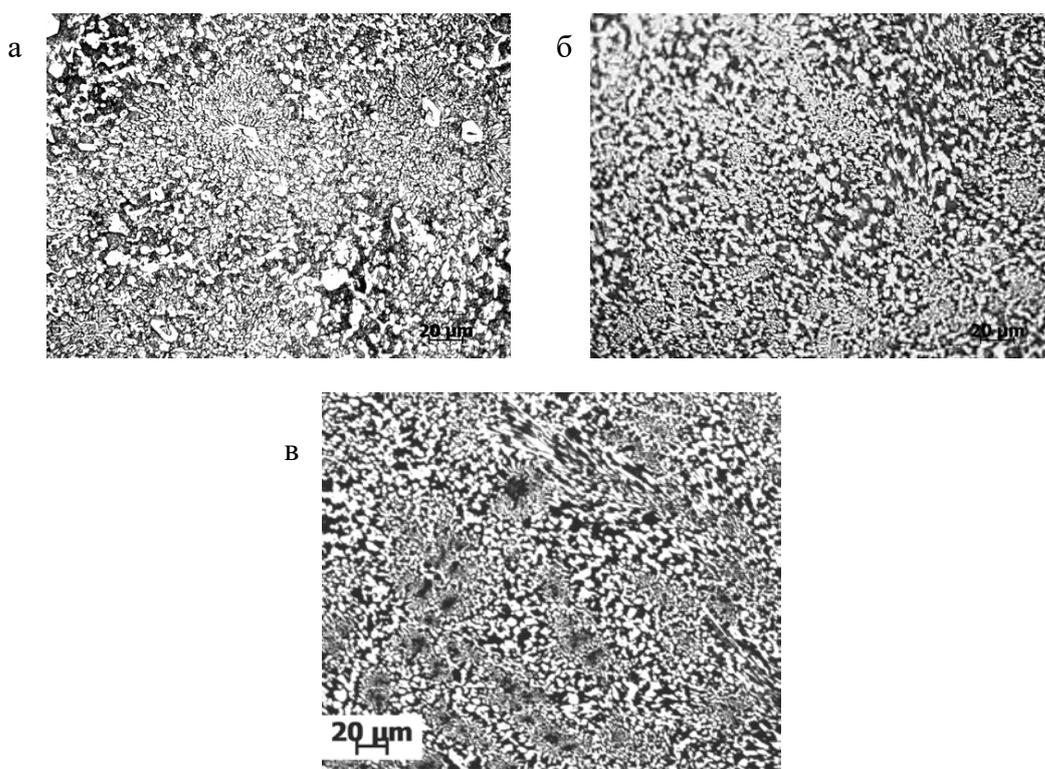
Термообработка износостойких хромистых чугунов (ИЧХ) значительно повышает износостойкость деталей [1]. Но на практике более 90 % отливок из хромистых чугунов используются в литом состоянии. Поэтому испытания на износостойкость проводились с наиболее распространенными чугунами в литом состоянии.

**Основная часть**

Стандартная методика ускоренных испытаний на износ хромистых чугунов с использованием наждачной бумаги с покрытием из карбида кремния дает очень близкие, мало отличающиеся между собой, результаты, независимо от их твердости, химического состава и структуры [1]. Это обусловлено тем, что из-за высокой твердости и остроугольности абразива износ материалов происходит, в основном, в режиме микро-резания. В реальных условиях эксплуатации деталей интенсивность износа значительно ниже, так как превалирует отрыв частиц и усталостное разрушение поверхности.

В условиях лабораторных ускоренных испытаний была изучена относительная износостойкость хромистых чугунов эвтектического состава ИЧХ28Н2, ИЧХ18, ИЧХ18ВМ, кроме износостойкости исследовалась ударная вязкость (ударостойкость), как наиболее критическая величина для хромистых чугунов.

Хромистый чугун ИЧХ28Н2 (Cr – 27 %, С – 3,1 %, Ni – 1,5 %) был выбран как наиболее распространенный износостойкий чугун в СНГ и Республике Беларусь. Комплексно легированный никелем, молибденом и ванадием чугун ИЧХ18 (С – 3,4 %, Cr – 18,5 %, Mo – 0,6 %, V – 0,6 %, Ni – 0,7 %) обладает оптимальными механическими свойствами, хорошо зарекомендовал себя в машиностроении [2]. Разработанный в «Институте технологии металлов» НАН Беларуси экономно легированный экспериментальный чугун ИЧХ18ВМ (С – 3,45 %, Cr – 18,8 %, W – 0,6 %, Mo – 0,4 %, V – 0,2 %, Ni – 0,25 %) применяется для литья деталей дробильно-размольного оборудования, строительной техники (ТУ ВУ 700002421.004-2011) [3]. Образцы чугунов для испытаний отливались в земляные формы. Структуры показаны на рисунке 1.



а – ИЧХ28Н2; б – ИЧХ18; в – ИЧХ18ВМ

Рисунок 1 – Структуры чугунов,  $\times 500$

Микроструктура литых чугунов имеет различную морфологию и тип карбидной фазы. Так в чугунах ИЧХ28Н2 наряду с мелкими карбидами имеются крупные тетрагональные карбиды, находящиеся в центре эвтектической ячейки (рисунок 1а). Чугуны марки ИЧХ18 и ИЧХ18ВМ имеют строго направленную в сторону теплоотвода структуру с равномерным размером карбидов (рисунки 1б, 1в).

Испытание чугунов проводилось в режиме сухого трения с плоскопараллельным перемещением образца относительно пластины из абразивного материала (карбид кремния с размером зерна 0,1-0,063 мм). С целью затупления зерен поверхностного слоя абразивной пластины проводилась ее приработка. В результате этого интенсивность износа уменьшилась в несколько раз и стабилизировалась, а износ из микрорезания перешел в износ с сочетанием многих факторов разрушения поверхности. Испытывались образцы высотой 27 мм с диаметром истираемой поверхности 17,5 мм. Средняя скорость движения образца была 0,25 м/с, а нагрузка – 55 Н. Приработка образца проводилась в течение 1,5 часов, а время последующих испытаний составляло 3 часа. Раз-

брос значений нескольких последующих испытаний одного и того же образца не превышал 5 %. Коэффициент относительной износостойкости определялся как отношение потери массы при испытаниях эталонного  $\Delta G_0$  и испытуемого  $\Delta G$  образцов  $K = \Delta G_0 / \Delta G$ . В качестве эталона использовался образец из чугуна ИЧХ28Н2 в литом состоянии твердостью 52-53 HRC. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

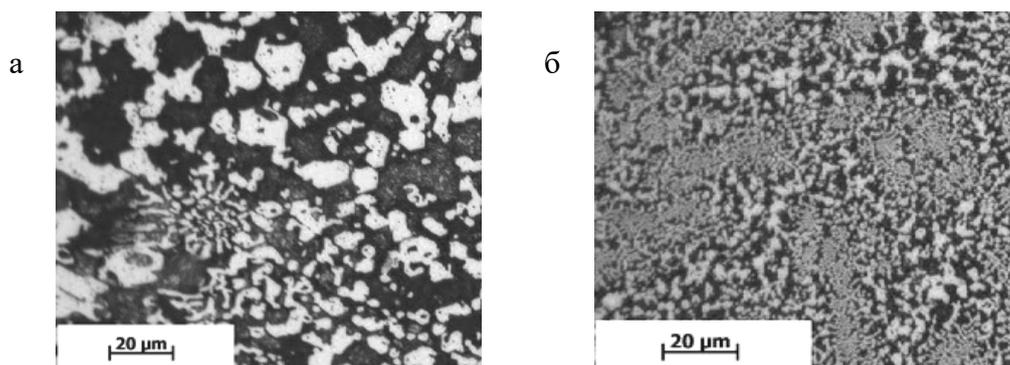
Таблица 1 – Относительная износостойкость и ударная вязкость хромистых чугунов эвтектического состава (литье в земляные формы)

Показатель	Марка чугуна		
	ИЧХ28Н2	ИЧХ18	ИЧХ18ВМ
Твердость в литом состоянии, HRC	52-53	54-55	54-55
Коэффициент относительной износостойкости чугунов в литом состоянии*	1	2,2	2,4
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	11,4	10,5	13,8
*эталон чугун ИЧХ28Н2 в литом состоянии (испытания в лабораторных условиях)			

Экспериментальный чугун ИЧХ18ВМ имеет более высокую износостойкость и ударную вязкость, чем ИЧХ28Н2 и ИЧХ18. Его стоимость ниже, чем у вышеназванных сплавов.

Наиболее перспективной технологией, позволяющей повысить эксплуатационные характеристики деталей из износостойких чугунов за счет увеличения скорости охлаждения при кристаллизации (по сравнению с литьем в земляные формы), является метод литья в металлические формы [4].

На рисунке 2 показаны структуры чугуна ИЧХ18ВМ литого в земляную форму и металлическую форму, а в таблице 2 – относительная износостойкость и ударная вязкость этого сплава. Структура при литье в металлические формы измельчается в 3-4 раза.



а – литье в земляную форму; б – литье в металлическую форму  
**Рисунок 2 – Структура чугуна ИЧХ18ВМ, ×500**

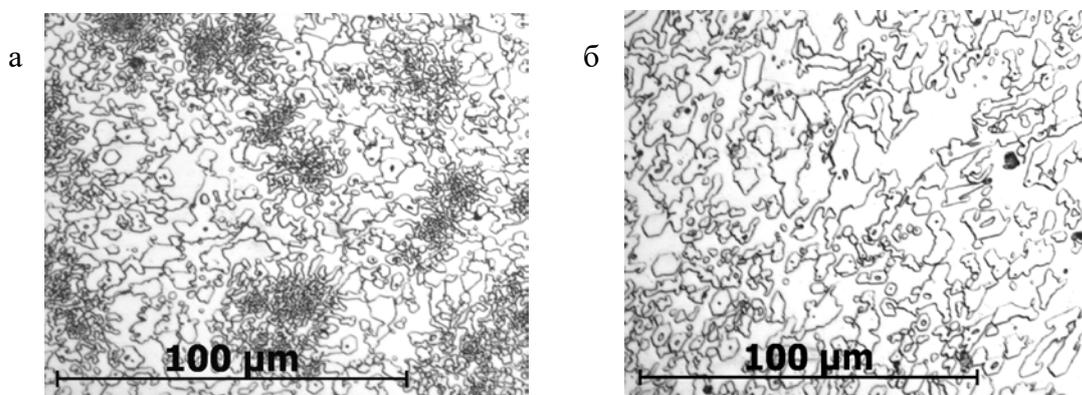
Кроме повышения износостойкости на 20-30 % и твердости до 61 HRC при литье в кокиль увеличивается ударная вязкость на 15-20 % до 15,5-17 Дж/см<sup>2</sup>.

Дальнейшее увеличение износостойкости возможно за счет воздействия на первичную кристаллизацию чугунов. В этом случае, изменяется размер карбидов, их морфология, расположение в металлической матрице.

Таблица 2 – Относительная износостойкость и ударная вязкость хромистого чугуна ИЧХ18ВМ эвтектического состава (литье в земляные формы и кокиль)

Показатель	Марка чугуна	
	ИЧХ18ВМ (литье в земляные формы)	ИЧХ18ВМ (литье в металлические формы)
Твердость в литом состоянии, НРС	54-55	57-61
Коэффициент относительной износостойкости чугунов в литом состоянии*	1	1,25
Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>	13,8	15,8
*эталон чугун ИЧХ18ВМ литой в земляную форму (испытания в промышленных условиях)		

Известно, что в одной и той же отливке в зависимости от расположения поверхностей деталей в литейной форме создаются разные условия кристаллизации. Кроме того, можно целенаправленно изменить параметры кристаллизации: скорость затвердевания, направление роста кристаллов и т.д. Для изучения влияния первичной кристаллизации на износостойкость хромистых чугунов были проведены лабораторные испытания на износ разных поверхностей одной и той же отливки «Подкладной лист» для центробежной мельницы. Толщина плоской детали составляла 25 мм. Исследовались верхняя и нижняя части отливки. В нижней части отливки расположены более разветвленные карбиды по сравнению с верхней частью. Это связано с разными условиями кристаллизации. Нижняя часть детали под действием силы тяжести всегда прижата к металлической форме, а в верхней части при кристаллизации из-за усадки образуется воздушный зазор, что снижает скорость охлаждения. Испытания образцов проводились по методике, подобной описанной выше. Для ускорения испытаний и использования образцов из реальных отливок вместо плоскопараллельного перемещения применялось вращательное перемещение абразивного круга относительно испытываемого материала. Параметры испытаний (скорость, нагрузка и т.д.) подбирались исходя из реальной скорости износа деталей в процессе эксплуатации. На рисунке 3 показаны структуры верхней и нижней частей отливок.



а – верхняя часть отливки; б – нижняя часть отливки

Рисунок 3 – Структура чугуна ИЧХ18ВМ (литье в металлическую форму), ×500

Испытания показали более высокую на 15-20 % износостойкость нижней части. Поэтому, предпочтительно в качестве рабочих поверхностей деталей выбирать нижнюю часть отливок.

### Заключение

Проведены исследования износостойкости и ударной вязкости хромистых чугунов ИЧХ28Н2, ИЧХ18, ИЧХ18ВМ. Показано, что наиболее распространенный в СНГ и Республике Беларусь чугун ИЧХ28Н2 уступает по износостойкости чугунам ИЧХ18, ИЧХ18ВМ. Экспериментальный износостойкий чугун ИЧХ18ВМ обладает более высокой износостойкостью и ударной вязкостью при более низкой стоимости. Налажено производство деталей из этого чугуна. Дальнейшее увеличение износостойкости, ударной вязкости и твердости возможно за счет литья в металлические формы, а увеличение износостойкости – также за счет использования в качестве рабочих поверхностей нижней части отливок.

### Список использованных источников

1. **Цыпин, И.И.** Белые износостойкие чугуны / И.И. Цыпин. – М.: Metallurgy, 1983. – 176 с.
2. **Комаров, О.С.** Повышение ресурса работы сменных деталей почвообрабатывающей техники / О.С. Комаров, К.Э. Барановский, О.А. Сусина // Новые материалы и технологии: тез. докл. РНТК. – Минск, 1994. – С. 154.
3. Износостойкость и механические свойства хромистых чугунов / К.Э. Барановский [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 3. – С. 96-100.
4. **Барановский, К.Э.** Пути повышения износостойкости деталей из хромистых чугунов / К.Э. Барановский [и др.] // «Чтения памяти В.Р. Кубачека». Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. докладов XII МНТК, Екатеринбург, 24-25 апреля 2014 г. / ФГБОУ ВПО «Уральский государственный университет». – Екатеринбург, 2014. – С. 275-279.

---

**Baranovsky K.E., Urbanovich N.I., Basalai I.A., Rozenberg Ye.V., Ilyushenko V.M., Duvalov P.Yu.**

### Wear resistance test of chromic cast irons in the cast condition

*The paper states the results of wear resistance tests of chromic irons, cast into the ground and metallic moulds. It is shown that improvement of wear resistance and mechanical properties of cast irons is possible by using metallic moulds casting and by application as components working surfaces of lower parts of the castings.*

Поступила в редакцию 24.03.2015 г.

УДК 621.7:621.217

## МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИНГИБИТОРОВ ИЗНАШИВАНИЯ ИЗ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Овчинников Е.В.<sup>1</sup>, Авдейчик С.В.<sup>2</sup>, Антонов А.С.<sup>2</sup>, Мишук Ю.В.<sup>3</sup><sup>1</sup>Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия<sup>2</sup>УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», Беларусь<sup>3</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь

*Рассмотрены механизмы формирования разделительных слоев, образовавшихся из продуктов изнашивания компонентов металлополимерной трибосистемы, которые определяют механизмы и кинетику их фрикционного взаимодействия. С использованием барьерной модели обосновано образование на поверхности контртела трибосистемы (вала) «зарядовой мозаики», которая приводит к образованию локальных участков переноса с последующим их трансформированием в устойчивый разделительный слой, определяющий механизмы трения и изнашивания.*

### Введение

В концепции малоизнашивающейся трибосистемы, разработанной в [1, 2], ведущая роль принадлежит ингибиторам изнашивания – компонентам, введенным в состав трибосистемы извне или образовавшимся в результате трибохимических реакций, способствующим подавлению неблагоприятного цикла превращений, интенсифицирующего процесс изнашивания. При любых видах контактных взаимодействий в трибосистеме различного состава и конструктивного исполнения формируются слои, выполняющие функции противоизносных компонентов. Одной из важнейших задач триботехники является обеспечение условий образования таких слоев с параметрами, необходимыми и достаточными для устойчивой эксплуатации узла трения в течение заданного ресурса. Решение этой задачи базируется на системном анализе особенностей трибохимических превращений компонентов трибосистемы в определенных условиях функционирования, выявлении преобладающих циклов контактных реакций, определяющих износ, и подборе эффективных методов управления ими путем конструктивных, технологических, материаловедческих решений [1-6].

Выбор конкретного типа ингибитора изнашивания, определяющего совместимость компонентов пары трения [1], а значит и наиболее оптимальные режимы ее эксплуатации [7], предполагает анализ различных вариантов реализации условий функционирования при заданных эксплуатационных режимах [1-10].

В связи с этим, существенный научный и практический интерес представляет исследование влияния энергетического состояния компонентов трибосистемы на механизм и кинетику формирования разделительных слоев в зоне фрикционного контакта подшипника и вала, структура и устойчивость которых определяет параметры триботехнических характеристик.

### Результаты и обсуждение

Известно, что фрикционное взаимодействие компонентов металлополимерной трибосистемы – вала и подшипника – сопровождается явлениями переноса продуктов

износа и формирования разделительного слоя, состав и структура которого зависит от используемых материалов и условий эксплуатации узла трения [1].

При направленном регулировании физико-химических процессов в зоне контакта возможно создание условий для преобладающего образования продуктов, которые будут снижать коэффициент трения и увеличивать износостойкость узла, т.е. выполнять функцию компонента, уменьшающего скорость изнашивания, – ингибитора изнашивания [1].

Учитывая особенности конструктивного, материаловедческого и технологического исполнения распространенных металлополимерных узлов трения, можно утверждать, что при любом варианте их практической реализации в процессе эксплуатации всегда образуются компоненты различного состава, строения, механизма действия, которые оказывают ингибирующее действие на процесс их изнашивания, т.е. на ресурс технической эксплуатации. Весь вопрос состоит в том, что ингибирующее действие подобных продуктов трибохимических реакций определяется количеством и способностью формирования так называемого «разделительного слоя» с достаточно большим временем противоизносного действия – устойчивостью. Поэтому в трибосистемах с низким эксплуатационным ресурсом, как правило, содержание продуктов ингибирующего действия недостаточно для обеспечения необходимой устойчивости разделительного слоя. Поэтому необходимо использование специальных приемов, способствующих образованию в трибосистеме ингибиторов изнашивания определенного состава, структуры и механизма действия [1].

К числу эффективных ингибиторов изнашивания систем «металл-металл» и «металл-полимер» относят тонкие пленки фторсодержащих компонентов различной молекулярной массы, строения и технологии получения. Установлено, что независимо от особенностей структуры и массы, пленки фторсодержащих олигомеров, наносимые из растворов [8], формируемые из активной газовой фазы [9], ротационные пленки из продуктов ТГД-синтеза политетрафторэтилена [10], пленки переноса из продуктов изнашивания изделий из политетрафторэтилена и композитов эффективно снижают износ трибосистем [11-13], эксплуатируемых без подвода внешней смазки или при смазывании маслами и пластичными композициями на основе нефтяных и синтетических продуктов.

При различии технологий формирования ингибиторов изнашивания подобного типа, вероятно, существуют общие предпосылки реализации их благоприятного влияния на триботехнические процессы, обусловленные структурными особенностями тонких пленок на твердых подложках различного состава. Очевидно, что существенную роль в структурных и фазовых превращениях тонкопленочных фторсодержащих ингибиторов изнашивания играют энергетические характеристики поверхности металлического контртела, которое представляет собой сложную гетерогенную систему.

Тонкопленочные ингибиторы изнашивания формируются на поверхностях трения компонентов трибосистемы, различающихся составом, структурой, топографией. При этом, если полимерный компонент трибосистемы *aripol* считают гетерогенным (даже при изготовлении его из промышленно выпускаемого полимерного материала одной марки) вследствие полидисперсного строения, наличия примесей, остатков катализатора и других технологически обусловленных ингредиентов, то сопряженное металлическое тело предполагают макрооднородным с определенными параметрами кристаллического строения, фазового состава, активности и механизма действия в трибохимических, электрофизических и теплофизических, адгезионных и других процессах в зоне контакта. В ряде работ однозначно указывают, например, на каталитическое или ингибирующее действие металлических подложек на процессы контактного окисления поверхностных слоев полимерного покрытия, считая, что оно определяет адгезионное взаимодействие статических и динамических металлополимерных систем [14].

Эффективным и распространенным видом ингибиторов изнашивания являются частицы слоистых веществ – графита, соединений серы (сульфидов, дисульфидов металлов), природных силикатов (глин, слюд, талька, серпентина) [11-13]. Преимущественный механизм их ингибирующего действия заключается в образовании в зоне трения разделительного слоя с низким сопротивлением тангенциальному сдвигу и способностью к знакопеременному переносу, обеспечивающему его повышенную устойчивость. Учитывая особые теплофизические характеристики слоистых углерод-, кремний- и металлосодержащих компонентов, можно предполагать их дальнейшее распространение при создании трибосистем повышенного эксплуатационного ресурса.

Экспериментальные данные, между тем, свидетельствуют о неоднозначном влиянии металлического контртела на кинетику переноса, структуру пленок, осажденных на поверхности подложек из активной газовой фазы в вакуумной камере, растворов и расплавов полимеров и олигомеров, образование адгезионных соединений со стабильными параметрами в течение длительного времени эксплуатации. Например, известны литературные данные о неоднородном строении поверхностных слоев, образованных при разрушении адгезионной металлополимерной склейки, характеризующихся наличием участков с различным типом соединения адгезионно закрепленных фрагментов полимерного компонента и участков без следов адгезионного разрушения [14].

Сопоставление характерных структур тонких пленок, образованных на металлических подложках по различным механизмам (напылением, осаждением из активной газовой среды, ротационным методом, окунанием в раствор, разрушением адгезионного слоя и т.п.), свидетельствует о выраженной неоднородности их поверхностного слоя. Кроме того, классические представления материаловедения основаны на экспериментально доказанных особенностях кристаллизации расплавов металлов, обуславливающих образование зерненной структуры с наличием выраженных границ раздела [15]. Различные виды термической, химико-термической, термомеханической и других обработок способствуют формированию гетерогенных структур с заданными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических, коррозионных, теплофизических и других служебных характеристик металлических изделий [16]. Очевидным следствием гетерогенного строения металлических компонентов является неравновесность процессов переноса зарядов между отдельными участками поверхностного слоя и на границе раздела компонентов статических и динамических металлополимерных систем, которые оказывают существенное влияние на контактные процессы, прежде всего, на механизм и кинетику коррозионно-механического изнашивания [17-21].

В связи с этим, существенный интерес представляет анализ особенностей строения металлических компонентов с точки зрения зарядового состояния поверхностного слоя металлического субстрата [22].

В модели свободного независимого электрона (адиабатическое приближение) гамильтониан в уравнении Шредингера имеет вид:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + u(\vec{r}), \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка;

$m$  – масса электрона;

$\Delta$  – оператор Лапласа;

$u(\vec{r})$  – функция потенциала.

Если гамильтониан (1) применяется для описания состояния электрона в кристалле, то есть в поле периодического потенциала, то

$$u(\vec{r}) = u(\vec{r} + \vec{R}), \quad (2)$$

где  $\vec{R}$  – вектор трансляции, равный

$$\vec{R} = m\vec{a} + n\vec{b} + p\vec{c}, \quad (3)$$

где  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  – репер Бравэ;

$m$ ,  $n$ ,  $p$  – целые числа.

Решением уравнения Шредингера [22] для адиабатического приближения при наличии периодического потенциала является волновая функция  $\Psi_{nk}$ , определяемая теоремой Блоха.

$$\Psi_{nk}(\vec{r}) = \varphi_{nk}(\vec{r}) \cdot \exp i\vec{k}\vec{r}, \quad (4)$$

где  $\vec{k}$  – волновой вектор  $\vec{k} = 2\pi\vec{s}$ ;

$\vec{s}$  – вектор обратной решетки;

$i$  – мнимая единица.

Функция  $\varphi_{nk}(\vec{r})$  обладает свойством периодичности:

$$\varphi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) = \varphi_{nk}(\vec{r}). \quad (5)$$

Из формул (1-5) следует

$$\begin{aligned} \Psi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) &= \varphi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) \cdot \exp i\vec{k}(\vec{r} + \vec{R}) = \\ &= \varphi_{nk}(\vec{r}) \exp i\vec{k}\vec{r} \cdot \exp i\vec{k}\vec{R} = \Psi_{nk}(\vec{r}) \cdot \exp i\vec{k}\vec{R}. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученное уравнение

$$\Psi_{nk}(\vec{r} + \vec{R}) = e^{i\vec{k}\vec{R}} \cdot \Psi_{nk}(\vec{r}) \quad (7)$$

является другой формой записи теоремы Блоха [18, 22].

Из условия (7) видно, что волновая функция электрона в поле периодического потенциала ( $\psi(\vec{r})$ ) соответствует решению уравнения Шредингера для свободного электрона ( $\psi(\vec{r})_f$ )

$$[\Psi_k(\vec{r})]_f = \psi_0 \exp(i\vec{k}\vec{r}), \quad (8)$$

но вместо постоянного амплитудного множителя  $\psi_0$  в решении (7) стоит волновая функция с периодом  $R$ . Волновое число ( $k$ ) называют номером зоны. При фиксированном  $k$  имеется много независимых собственных состояний с определенными значениями энергии, которые распределены по зонам, разделенным значениями энергии, которые не являются собственными значениями оператора Гамильтона, то есть, запрещены для электронных состояний [22].

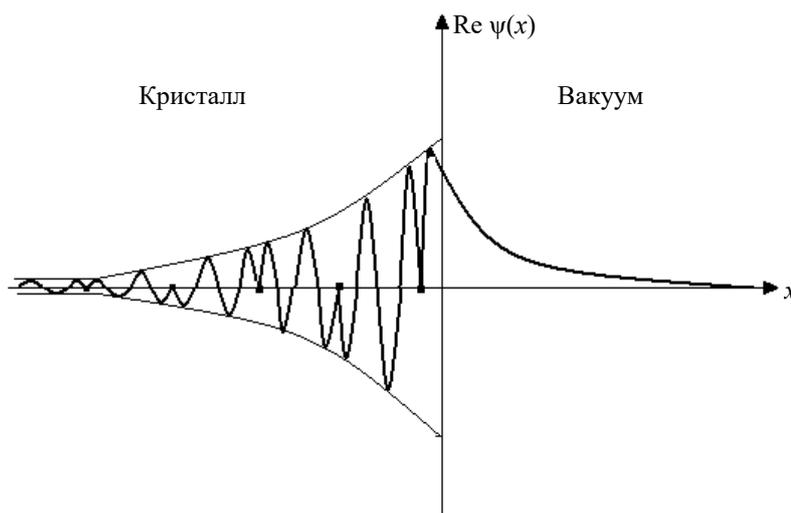
При попытке описать состояние электрона вблизи поверхности кристалла следует учитывать, что в этих областях вещества нарушается периодичность потенциала, а на поверхности кристалла создается, так называемый, поверхностный барьер, форма которого зависит от очень многих факторов, начиная от дефектов различной природы (кстати, сама поверхность является двухмерным дефектом), а также от морфологии по-

верхностных слоев. Функция поверхностного потенциала ( $u_s$ ) изменяет свою форму при переходе от одной точки поверхности к другой, то есть

$$u_s = u(\vec{Q}), \quad (9)$$

где  $\vec{Q}$  – радиус-вектор точек поверхности.

В работе [15] показано, что при нарушении периодичности потенциала вблизи поверхности волновая функция приобретает вид, отличный от тех, что приведены условиями (5) и (9). Пример поверхностной волновой функции представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Пример волновой функции одноэлектронного поверхностного уровня, изображенной в направлении оси  $x$ , перпендикулярном поверхности [15, 22]**

Заметим, что функция  $\psi$  спадает по экспоненте снаружи металла и имеет экспоненциально убывающую огибающую внутри него. В этом случае наряду с действительными волновыми векторами  $\vec{k}$  внутри кристалла существуют другие решения с комплексными волновыми векторами, которые соответствуют состояниям электронов, локализованных вблизи поверхности кристалла, отличающимся от объемной. Эти поверхностные состояния с определенными уровнями энергии впервые были рассмотрены И.Е. Таммом и носят его имя – таммовские уровни [22].

При обсуждении объемных свойств кристаллов влиянием этих поверхностей уровней пренебрегают, так как отношение числа поверхностных уровней к числу блоховских уровней не превышает отношения числа поверхностных атомов к полному числу атомов в кристалле, которое для макроскопического образца не превышает  $10^{-8}$ .

В результате поверхностные уровни дают пренебрежительно малый вклад в объемные свойства; исключение составляют лишь нанообъекты, поверхностные и размерные факторы в которых играют большую, а часто, и решающую роль. Однако, и в монокристаллах таммовские уровни довольно важны при определении структуры кристаллической поверхности. Например, они должны учитываться при всяком подлинном микроскопическом расчете структуры поверхностного слоя [15, 22].

Для конкретных форм поверхностных потенциалов необходимо искать конкретное решение уравнения Шредингера. При этом необходимо анализировать не только действительные, но и комплексные волновые векторы, а затем исследовать вопрос: как будут «сшиты» волновые функции поверхностного слоя с внутренними блоховскими

функциями и экспоненциально убывающей по амплитуде волновой функцией во внешней для кристалла области. Самое главное, на наш взгляд, заключается в том, что, во-первых, определить форму потенциального барьера экспериментально очень трудно, если вообще это возможно, так как сам процесс его измерения внесет сильные искажения в форму барьера, а во-вторых, функционал поверхностного потенциала зависит от многих факторов и различен для различных точек поверхности [22].

В то же время, само наличие поверхностного потенциала, как следствие появления такого дефекта каковым эта поверхность является, при любой его форме приводит к появлению поверхностных (таммовских) уровней, которых нет в объемной зонной структуре.

Рассмотрим одномерный случай. Пусть состояние электронов характеризуется дискретным спектром собственных значений оператора Гамильтона, а ось  $x$  перпендикулярна поверхности кристалла [22]. Волновые функции в объеме  $\psi^{(0)}(x)$  и на поверхности  $\psi(x)$  являются решениями соответствующих уравнений Шредингера

$$\begin{aligned}\widehat{H}^{(0)}\Psi_n^{(0)}(x) &= E_n^{(0)}\Psi_n^{(0)}(x); \\ \widehat{H}\Psi_k(x) &= E_k\Psi_k(x).\end{aligned}\tag{10}$$

Предположим, что уравнение (10) имеют одинаковую по числу решений систему функций, т.е.  $n, k = 1, 2, 3, \dots, N$ . Тогда к ним применимо понятие скалярного произведения

$$\begin{aligned}(\widehat{H}\Psi_k, \Psi_n^{(0)}) &= E_k(\Psi_k, \Psi_n^{(0)}); \\ (\Psi_k, \widehat{H}^{(0)}\Psi_n^{(0)}) &= E_n^{(0)}(\Psi_k, \Psi_n^{(0)}).\end{aligned}\tag{11}$$

Отсюда

$$(\widehat{H}\Psi_k, \Psi_n^{(0)}) - (\Psi_k, \widehat{H}^{(0)}\Psi_n^{(0)}) = (E_k - E_n^{(0)})(\Psi_k, \Psi_n^{(0)}).\tag{12}$$

Так как

$$\begin{aligned}\widehat{H} &= -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + U, \\ \widehat{H}^{(0)} &= -\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V\end{aligned}\tag{13}$$

содержат независимые друг от друга функции поверхностного  $U$  и объемного  $V$  потенциалов, то левая часть уравнения (10) отлична от нуля [22]. Следовательно,

$$(\Psi_k, \Psi_n^{(0)}) \neq 0.\tag{14}$$

Это означает, что  $\psi_k$  и  $\psi_n^{(0)}$  образуют независимые системы функций, причем количество собственных значений для этих двух состояний в общем случае не связаны друг с другом. Уравнения (10) с учетом (13) запишем в виде

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \psi_k(x)}{\partial x^2} + q_k^2 \psi_k(x) &= 0; \\ \frac{\partial^2 \psi_n^{(0)}(x)}{\partial x^2} + q_n^2 \psi_n^{(0)}(x) &= 0,\end{aligned}\tag{15}$$

где  $q_k^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(U - E_k)$ ;

$$q_n^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(V - E_k^{(0)}).$$

Решения уравнений (15) ищем в виде

$$\Psi_k(x) = A \exp(iq_k x); \quad (16)$$

$$\Psi_n^{(0)}(x) = B \exp(iq_n x),$$

отсюда

$$\ln \frac{\Psi_k}{\Psi_n^{(0)}} = \ln C + ix(q_k - q_n), \quad (17)$$

где  $C = A/B$ .

Так как  $q_k \neq q_n$  и эти величины независимые, то

$$\ln \frac{\Psi_k}{\Psi_n^{(0)}} \neq \text{const}, \quad (18)$$

то есть функции  $\Psi_n^{(0)}(x)$  или их линейные комбинации не могут быть собственными функциями оператора  $\hat{H}$ , а  $\Psi_k(x)$  – собственными функциями оператора  $\hat{H}^{(0)}$ .

Если уравнение (10) имеет различные количества решений, т.е.  $k \neq n$ , то в том случае, в котором число решений больше, можно брать линейные комбинации волновых функций, то есть с одной стороны, все решения учитываются, а с другой – будет осуществлен переход к одинаковому числу решений [22].

В кристаллах со спайностью структурные дефекты по обе стороны от плоскости расслоения при образовании ювенильной поверхности различны [9, 22]. Это объясняет наличие электронной мозаики на поверхностях диэлектриков [18, 22], но не позволяет, на первый взгляд, объяснить появление электрически заряженных областей на поверхности металлов, а именно эти заряды создает, по терминологии Т.И. Дистлера, подробно изучавшего это явление, своеобразный «электрический рельеф» поверхности поликристаллических металлов [19, 20]. Этот «рельеф» формируется декорированием поверхности порошком антрахинона и даже осажденными на поверхности каплями воды [20].

Следовательно, рассмотренная модель не полностью соответствует физической ситуации, наблюдаемой рядом авторов экспериментально [17, 19, 20].

Это различие устраняется, если мы учтем, что и распределение дефектов в этих частицах также неодинаково, а межзонная граница является потенциальным барьером. Заметим, что состав и кристаллохимическое строение этой границы могут сильно отличаться от состава и строения самой частицы. Например, она может представлять собой оксиды, может быть обогащена атомами других элементов (присадки или легирующие элементы), может иметь иной фазовый состав, представлять продукт химического взаимодействия компонентов и др. [16]. Во всех этих случаях проводимость имеет другое, по сравнению с проводимостью частиц, значение. Отсюда следует, что для анализа энергетического состояния металлических субстратов можно применить барьерную модель [22].

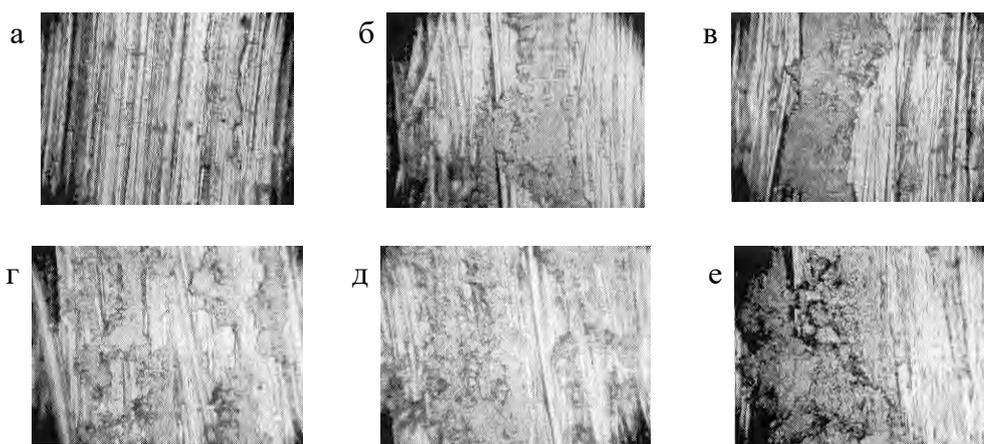
Для субстратов из металлов и сплавов присуща особая текстура, определяемая составом компонентов и условиями получения полуфабриката. В оптимальных условиях формируется структура, состоящая из несовершенных кристаллитов, называемого

зернами [16], геометрические параметры и дефектность которых в значительной степени определяют параметры субстрата в целом при различных видах эксплуатационного воздействия. Граница раздела кристаллитов в металлическом субстрате представляет собой барьер для движения электронов с разным коэффициентом прозрачности [15, 18]. Различие в строении и дефектности кристаллитов (зерен) металлического субстрата и приводит к появлению на его поверхности электрически заряженных участков с размерами, много бóльшими атомов. Следовательно, две контактирующие друг с другом частицы вследствие наличия между ними потенциального барьера приобретают различные по знаку электрические заряды. Поверхность образца поликристаллического металла в целом остается электронейтральной, но ее адгезионные, триботехнические, адсорбционные и другие свойства зависят не только от кристаллохимических свойств поверхностных слоев, но и наличия поверхностной зарядовой мозаики. В пределах отдельного зерна металлического поликристалла электрические заряды расходятся друг от друга на максимальные расстояния, то есть распределяются на периферии этих зерен [22].

Наличие зарядовой мозаики оказывает существенное влияние на процессы массопереноса и формирования разделительного слоя с необходимой устойчивостью для обеспечения необходимых параметров триботехнических характеристик (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) металлополимерной трибосистемы.

Поверхность трения металлического компонента трибосистемы (вала, контртела) характеризуется не только особыми энергетическими, но и геометрическими параметрами, зависящими от технологической предыстории его изготовления. При повышении качества обработки, характеризуемого размерами и формой микронеровностей поверхности трения, роль энергетического компонента в способности поверхностного слоя к взаимодействию с продуктами трибохимических реакций возрастает и для высокоточных (прецизионных) узлов трения становится превалирующей.

Фрикционное взаимодействие компонентов металлополимерной трибосистемы обуславливает образование на контактных поверхностях слоя с характерной морфологией (рисунок 2).



а – исходный образец; б – после 10 циклов; в – после 20 циклов; г – после 30 циклов;  
д – после 40 циклов; е – после 50 циклов

**Рисунок 2 – Морфология поверхностного слоя образца из стали 45 после  
фрикционного взаимодействия с графитовым образцом**

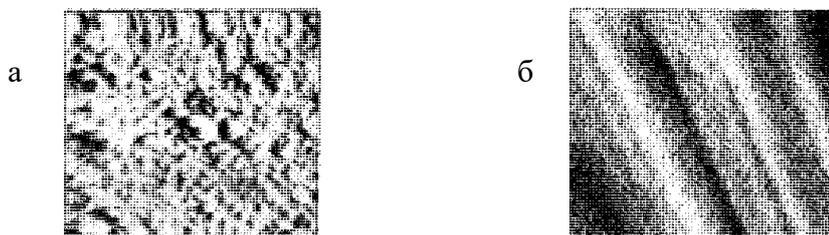
Закрепление частиц изнашивания модельного образца, изготовленного прессованием графитовых частиц с размером 1-5 мкм, является результатом совокупного действия энергетического (зарядового) и морфологического (размерного) факторов. Об этом свидетельствует характерное строение перенесенного слоя, площадь которого нелинейно зависит от числа циклов фрикционного взаимодействия компонентов трибосистемы (рисунок 2, б-е). Нестабильный характер процесса образования разделительного слоя приводит к нарушению процесса устойчивой (стабильной) эксплуатации узла трения конкретного конструктивного исполнения, что может обусловить выход его из строя при отклонении расчетных режимов от реальных, вызванных сочетанием различных факторов – материальных, организационных, квалификационных и других.

Эффективным направлением повышения параметров эксплуатационного ресурса и надежности трибосистем является использование специальных методов повышения устойчивости разделительных слоев путем выбора состава компонентов, технологии подготовки поверхностей деталей трения, направленного регулирования механизмов и кинетики благоприятных циклов триботехнических реакций [1, 2]. Очевидно, что при выборе таких методов особое значение приобретает учет энергетических особенностей веществ, формирующих ингибиторы изнашивания, которые обусловлены их составом, кристаллохимическим строением, дефектностью и другими факторами.

К числу эффективных ингибиторов изнашивания металлополимерных трибосистем относятся тонкопленочные покрытия, сформированные по растворным и вакуумным технологиям. Известно, что нанесение на поверхности трения тонких пленок фторсодержащих олигомеров типа «Эпилам», «Фолеокс» [8], а также формирование пленок из нитридов и карбидов титана (TiN, TiC, TiCN и др.) обеспечивает повышение износостойкости пар трения различного конструктивного исполнения.

Многофакторный механизм ингибирующего действия подобных тонких пленок определяется и энергетическим состоянием металлического субстрата, на котором они сформированы.

Анализ особенностей морфологии поверхностного слоя металлической подложки методом АСМ, который основан на оценке энергетического взаимодействия микронеровностей рельефа с элементом измерительного устройства, свидетельствует о наличии характерных участков, различающихся по строению. Эти различия обусловлены не только технологией формирования покрытий, но и зарядовой мозаикой (рисунок 3).

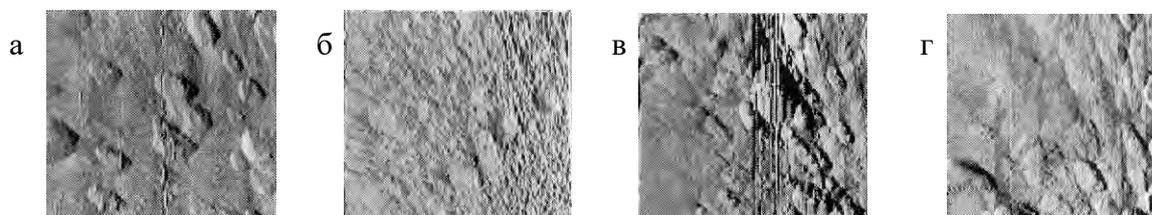


**Рисунок 3 – Морфология пленочной структуры, сформированной на поверхности кристалла силиката (а) и стали 45 (б) из фторсодержащих компонентов в газообразном состоянии (а) и в растворе (б). Поле сканирования 25×25 мкм [22]**

Благодаря действию двух факторов (энергетического и морфологического), независимо от технологии формирования покрытия – из раствора фторсодержащего олигомера, методом лазерного распыления политетрафторэтилена и его термической абля-

ции – на субстрате из силиката, углеродистой стали или стали с подслоем из TiN формируется тонкая пленка с характерной морфологией.

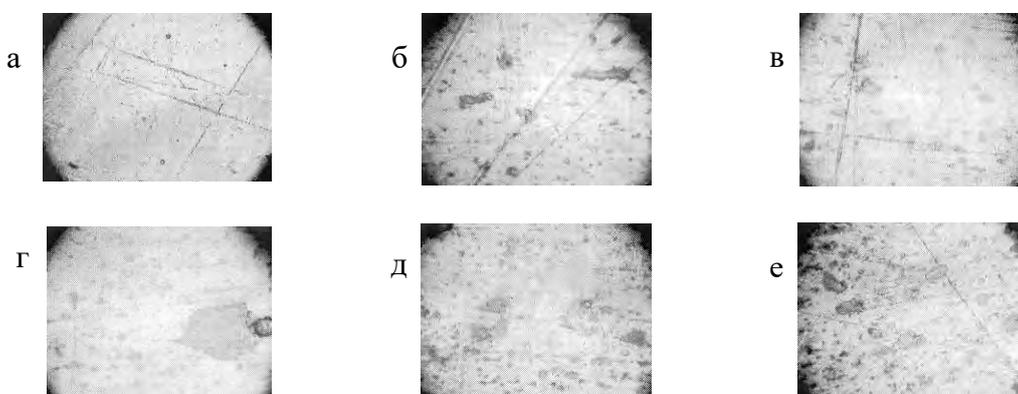
Необходимо подчеркнуть наличие на всех типах тонкопленочных структур характерных участков, образование которых обусловлено не исходной морфологией подложки, а наличием зарядовой мозаики (рисунки 3, 4).



а – исходная пленка фторопласта; б – термообработанная при  $T = 373$  К;  
в – термообработанная при  $T = 473$  К; г – термообработанная при  $T = 523$  К

**Рисунок 4 – Морфология пленки фторопласта, полученной распылением в вакууме, на подслое нитрида титана. Площадь сканирования  $24,8 \times 24,8$  мкм [23]**

Тонкие пленки фторсодержащих компонентов оказывают эффективное влияние на кинетику формирования разделительного слоя со свойствами ингибитора изнашивания. Нанесение на металлический субстрат подслоя из TiN без характерной капельной фазы не приводит к значительному увеличению скорости формирования разделительного слоя из частиц изнашивания модельной пары, в которой в качестве подшипника использован блок графита (рисунок 5).

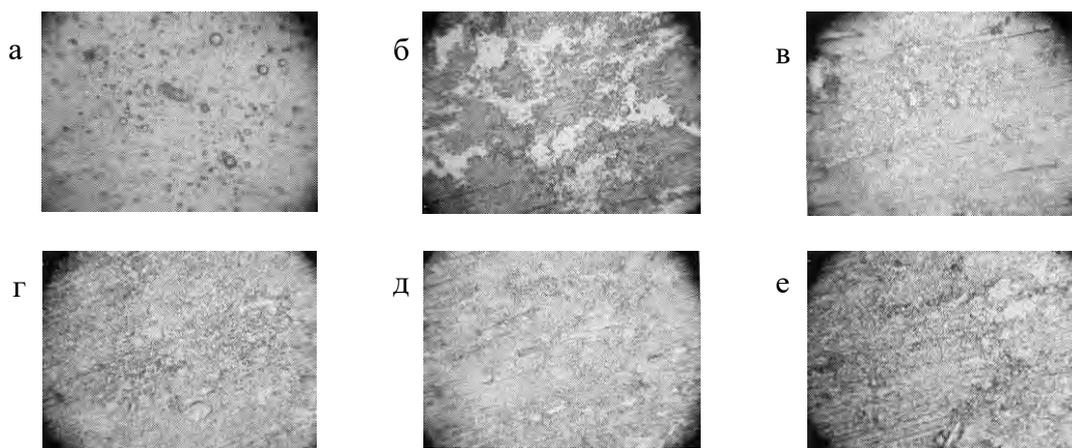


а – исходный подслой; б – после 10 циклов; в – после 20 циклов;  
г – после 30 циклов; д – после 40 циклов; е – после 50 циклов

**Рисунок 5 – Морфология подслоя TiN без капельной фазы после фрикционного воздействия с образцом из графита,  $\times 300$  [23]**

Кинетика формирования подобного слоя существенно изменяется при дополнительном нанесении тонкой пленки фторсодержащего олигомера, например, Фолекса марки Ф-1 (рисунок 6). В течение относительно небольшого времени контактного взаимодействия (10-20 циклов) образуется разделительный слой, занимающий не менее 90-95 % площади контакта металлического контртела (рисунок 6, б-е). Сформированный слой, состоящий из частиц графита и олигомерной матрицы, обладает низким сопротивлением сдвигу, способностью к многократному передеформированию без разрушения и знакопеременному переносу, которые определяют его ингибирующее действие в процессе эксплуатации трибосистемы.

Процессы тангенциального сдвига, многократного передеформирования и знакопеременного переноса обуславливают формирование достаточно гомогенного разделительного слоя практически на всей поверхности трения металлического компонента трибосистемы. Предварительное нанесение на рабочую поверхность тонкопленочного функционального слоя из фторсодержащего олигомера (фолеоксов марок Ф-1, Ф-14, В-1 и др.) или их аналогов (эпиламов) обеспечивает образование композита, в котором высокомолекулярный компонент выполняет функцию матрицы. Матрица способствует повышению устойчивости разделительного слоя в зоне фрикционного взаимодействия.



а – исходный поверхностный слой образца; б – после 10 циклов; в – после 20 циклов;  
г – после 30 циклов; д – после 40 циклов; е – после 50 циклов

**Рисунок 6 – Морфология поверхностного слоя образца из стали 45 с подслоем из TiN без капельной фазы, модифицированного олигомером Ф-14, после фрикционного взаимодействия с графитовым образцом,  $\times 300$  [23]**

Механизм действия тонкопленочных покрытий из фторсодержащих высокомолекулярных компонентов, наносимых с применением различных технологий (растворных, ротапринтных, вакуумных, механохимических), имеет заметные преимущества перед распространенными методами управления энергетическими и морфологическими параметрами элементов металлополимерной системы, т.к. обеспечивает высокую эффективность ингибирующего действия на процесс изнашивания, не требует использования специальной технологической оснастки (пескоструйной обработки, фосфатирования и т.п.) и может быть использован в высокоточных (прецизионных) узлах трения.

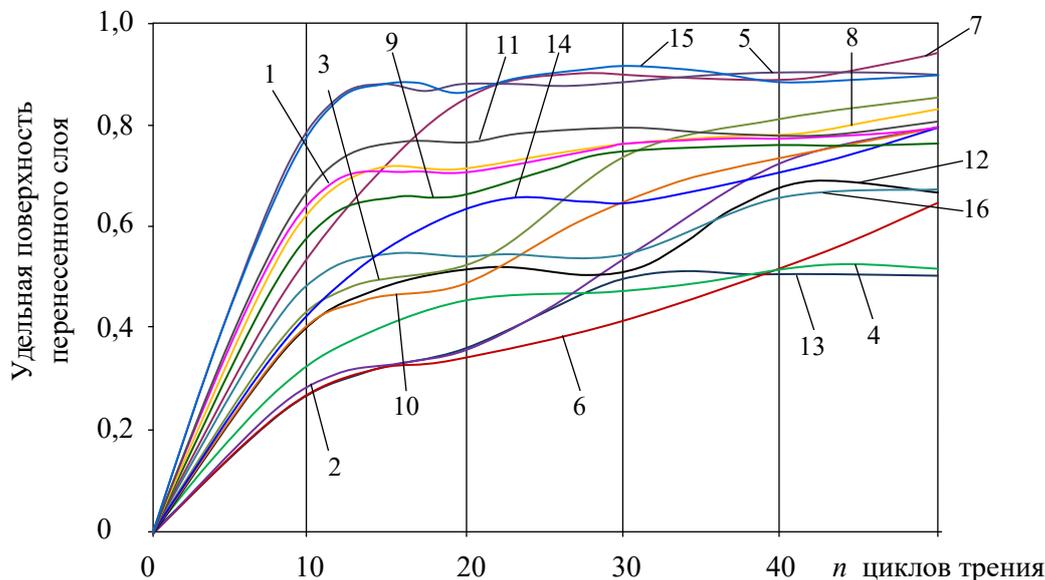
Наличие подслоя из фторсодержащих высокомолекулярных соединений способствует уменьшению времени приработки узла трения и формированию разделительного (перенесенного) слоя с удельной поверхностью  $W = 0,85 \div 0,95$  от общей площади поверхности трения (рисунок 7).

Таким образом, учет энергетического и морфологического факторов при выборе состава и технологии применения компонентов, обеспечивающих эффект ингибирования процесса изнашивания металлополимерной трибосистемы, обуславливает достижение повышенных параметров эксплуатационного ресурса и надежности.

### Заключение

Энергетическое состояние поверхностного слоя металлического компонента металлополимерной трибосистемы, обусловленное наличием зарядовой мозаики, определяет необходимость использования специальных компонентов для образования разде-

лительного слоя с повышенной устойчивостью. В качестве таких компонентов, способствующих формированию ингибиторов изнашивания, эффективны фторсодержащие полимерные и олигомерные соединения, наносимые по растворным, ротационным или вакуумным технологиям.



1 – нитрид титана + Ф-1; 2 – фосфатный слой 5 м + Ф-14; 3 – фосфатный слой 15 м + Ф-1; 4 – нитрид титана + Ф-14; 5 – нитрид титана («капельная» фаза) + Ф-1; 6 – фосфатный слой 15 м + Ф-14; 7 – ст.45 пескоструйная + Ф-1; 8 – ст.45 пескоструйная + Ф-14; 9 – нитрид титана («капельная» фаза) + Ф-14; 10 – фосфатный слой 30 м + Ф-14; 11 – фосфатный слой 30 м + Ф-1; 12 – ст.45 + Ф-14; 13 – ст.45 + Ф-1; 14 – фосфатный слой 15 м + Ф-14; 15 – фосфатный слой 5 м + Ф-1; 16 – нитрид титана (толщина слоя 5 мкм) + Ф-14

**Рисунок 7 – Кинетика массопереноса при трении углеродного образца по контртелу с различной предварительной подготовкой поверхности [23]**

#### Список использованных источников

1. Струк, В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук / В.А. Струк. – Минск, 1988. – 325 л.
2. Гольдаде, В.А. Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
3. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов: в 2 частях / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2007-2008. – 2 части.
4. Зайцев, А.Л. Физико-химические основы регулирования фрикционного взаимодействия полимеров со спеченными переходными металлами и сплавами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.Л. Зайцев. – Гомель, 2001. – 37 с.
5. Гороховский, Г.А. Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металлов / Г.А. Гороховский. – Киев: Наукова думка, 1972. – 152 с.
6. Адериха, В.Н. Исследование поведения антифрикционных наполненных систем на основе термостойких полимеров в процессе трения в широком интервале температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Адериха. – М., 1982.
7. Буше, Н.К. Совместимость трущихся поверхностей / Н.К. Буше, В.В. Копытько. – М.: Наука, 1984. – 128 с.

8. **Овчинников, Е.В.** Тонкие пленки фторсодержащих олигомеров: основы синтеза, свойства и применение / Е.В. Овчинников, В.А. Струк, В.А. Губанов. – Гродно: ГГАУ, 2007. – 326 с.
9. Наноконпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 403 с.
10. Металлополимерные наноконпозиты (получение, свойства применение) / В.М. Бузник [и др.]. – Новосибирск: изд-во Со РАН, 2005. – 260 с.
11. **Виноградов, А.В.** Создание и исследование машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. ... д-ра техн. наук / А.В. Виноградов. – Гомель, 1993. – 293 л.
12. **Охлопкова, А.А.** Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1996. – 162 с.
13. **Петрова, П.Н.** Разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и природных цеолитов Якутских месторождений: дис. ... канд. техн. наук / П.Н. Петрова. – Якутск, 2002. – 140 л.
14. **Белый, В.А.** Адгезия полимеров к металлам / В.А. Белый, Н.И. Егоренков, Ю.М. Плескачевский. – Минск: Наука и техника, 1971. – 286 с.
15. **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мерлин. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 399 с.
16. Материаловедение / В.А. Струк [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2008. – 519 с.
17. **Прейс, Г.А.** Электрохимические явления при трении металлов / Г.А. Прейс, А.Г. Дзюб // Трение и износ. – 1980. – Т. 2 (31). – С. 217-235.
18. **Ашкрофт, Н.** Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мерлин. – М.: Мир, 1981. – Т. 2.
19. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
20. **Дистлер, Г.И.** Декорирование поверхности твердых тел / Г.И. Дистлер, В.П. Власов, Ю.М. Герасимов. – М.: Наука, 1976. – 112 с.
21. **Дистлер, Г.И.** Исследования структуры и свойств твердых тел методами декорирования / Г.И. Дистлер // Известия АН СССР. – 1972. – Т. 36. – С. 1846-1851.
22. Прогрессивные машиностроительные технологии: в 2 т. / М.: Изд. дом «Спектр», 2011-2012. – Том II: Механизмы формирования структуры наноконпозиционных материалов на основе полимерных и олигомерных матриц / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Изд. дом «Спектр», 2012. – Т. II. – 336 с.
23. Технологическое обеспечение качества и ресурса при изготовлении, сборке, ремонте и восстановлении / С.М. Белобородов [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Изд. дом «Спектр», 2012. – 336 с.

---

**Auchynnikaŭ Ya.V., Audzeichyk S.V., Antonov A.S., Mishuk Yu.V.**

### **Mechanisms of formation of wear inhibitors from fluoropolymer components**

*In the paper considered mechanisms of the formation of separation layers formed from the wear products of metal-polymer tribosystem components that define the mechanisms and kinetics of their frictional interaction. With the use of barrier model is justified formation "charge-mosaic" on the surface of the opposing member (shaft) of tribosystem, which leads to the formation of local areas and their subsequent transfer to be transformed into a stable separation layer, which determines the mechanisms of friction and wear.*

Поступила в редакцию 23.03.2015 г.

УДК 532.021:022;539.021

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ В СЛОИСТЫХ СИЛИКАТАХ

Лиопо В.А.<sup>1</sup>, Овчинников Е.В.<sup>2</sup>, Ситкевич Ф.А.<sup>1</sup><sup>1</sup>УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь<sup>2</sup>Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

*Объектами исследования были кристаллы диоктаэдрического мусковита и триоктаэдрического флогопита, как типичных представителей большой группы слоистых силикатов. Использовались экспериментальные методы высокотемпературной рентгеновской дифрактометрии. Определялись структурные амплитуды рефлексов, по которым строились плоские  $\rho(x, y)$  и линейные  $\rho(z)$  проекции структурной электронной плотности. Установлено, что при температурах  $T \geq 800$  °С в октаэдрической сетке по схеме образуются молекулы воды согласно следующей реакции  $\text{OH}^- + \text{OH}^- \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$ . Нейтральная молекула воды выходит из кристалла. Октаэдр преобразуется в гептаэдр. Верхние основания тетраэдров создают гофрированную поверхность. Возникают механические напряжения, которые растут с увеличением температуры. Кристалл начинает растрескиваться и разрушаться. При этом возможно образование новых кристаллических силикатных разновидностей.*

### Введение

Природные слоистые силикаты широко используются в различных сферах деятельности человека. Наибольшее применение они находят в строительной индустрии [1], в электротехнике [2], при создании новых машиностроительных материалов [3] и др. Слоистые силикаты являются основным компонентом земной коры, а их склонность к изоморфизму привела к большому числу минералов этой группы [1-4]. В то же время, все представители слоистых силикатов в структуру своих кристаллов включают одинаковые атомные конфигурации. У всех слоистых силикатов есть сетки, созданные из октаэдров двух плотно упакованных слоев атомов кислорода. Внутри указанных полиэдров могут размещаться ионы двух-, трех- или четырехвалентных металлов. К этой октаэдрической сетке (ОК) примыкает слой атомов кислорода, часть которых отсутствует. В этой сетке остаются только кислородные тетраэдры, в которых размещаются атомы кремния, алюминия,  $\text{Fe}^{3+}$  и других элементов. Внутренние вершины полиэдров тетраэдрической сетки (Т) являются и вершинами октаэдров. Внешние основания тетраэдров формируют тригональные, дитригональные или гексагональные лунки. Кислородные атомы октаэдрической сетки, находящиеся под центрами этих лунок, замещаются группами  $(\text{OH})^-$  или в небольших количествах  $\text{F}^-$ . Связи между атомами слоистых силикатов в пределах тетраоктаэдрических сеток, формирующих элементарный слюдяной слой, носят валентный характер. Связи между слоями при их контакте обусловлены силами Ван-дер-Ваальса. Именно этой анизотропностью объясняется наличие у слоистых силикатов совершенной или весьма совершенной спайности [5]. Заметим, что в научной и технической литературе слоистые силикаты часто называют термином «чешуйчатые минералы» [3]. Очевидно, что при диспергировании макрокристаллов слоистых силикатов создаются чешуйки (пластинки) с одномерной наноразмерностью.

Толщина таких кристаллов может быть в наноразмерном диапазоне, а линейные размеры в плоскости наночешуйки могут иметь значения, соответствующие микронному и более диапазонам. Наночешуйки слоистых силикатов могут сворачиваться в спиральные трубки с диаметром в наноразмерном диапазоне. Электронно-микроскопические снимки этих силикатных аналогов углеродных нанотрубок, открытых намного позднее, также приведены в работе [6]. Кстати, название одного из слоистых силикатов обусловлено его «способностью» создавать такие объекты. Речь идет о вермикулите (от англ. *vermiform* – червеподобный).

Целью исследования являлось описание структурных изменений в слоистых силикатах при нагревании их кристаллов до температур  $T > 800$  °С.

### Методика исследований

Объектами исследования были кристаллы диоктаэдрического мусковита и триоктаэдрического флогопита, как типичных представителей большой группы слоистых силикатов. Использовались экспериментальные методы высокотемпературной рентгеновской дифрактометрии. Определялись структурные амплитуды рефлексов, по которым строились плоские  $\rho(x, y)$  и линейные  $\rho(z)$  проекции структурной электронной плотности. Для исследований применяли рентгеновское излучение МоК $\alpha$ -фильтрованное. Съемка рентгенограммы осуществлялась при температурах образца 20 °С и 800 °С.

### Результаты исследований

**Гидратация слоистых силикатов (на примере слюды).** Несмотря на большое многообразие слоистых силикатов, все они обладают спайностью, наличием октаэдрической и тетраэдрической сеток, формирующих элементарный структурный слой. В качестве типичного примера слоистых силикатов возьмем ди- и триоктаэдрические слюды. В диоктаэдрических разновидностях в пустотах октаэдрической сетки располагается трехвалентный ион металла. Из условия электростатической нейтральности в этом случае из каждых трех октаэдров заполнены ионами металла только два. У триоктаэдрических слюд три из трех октаэдров заполнены двухвалентными катионами металлов. Наибольшее применение находят диоктаэдрический мусковит  $K_2(Si_3Al)Al_2O_{10}(OH)_2$  и триоктаэдрический флогопит  $K_2(Si_3Al)Mn_3O_{10}(OH)_2$ . Именно эти слюды и являлись объектом исследований.

В слюдах молекулы воды встречаются в трех различных формах.

1. Молекулы воды заполняют участки между слоями, формируют водные включения – водяные линзы. Такая вода называется примесной. Эти включения примесной воды могут быть удалены путем нагрева кристаллов при температурах 150-250 °С. При этом молекулы примесной воды перемещаются по межслоевым промежуткам. При диспергировании такая вода удаляется вследствие локального нагрева и облегченного выхода из кристалла, размеры которого достаточно малы.

2. В межслоевых промежутках в гидратированных слюдах может находиться межслоевая вода, образующая монослой или бислой. Последнее энергетически более выгодно, и образование водных бислоев формирует вермикулитоподобную структуру в сильно гидратированных кристаллах слюд. Межслоевая вода может быть удалена из слюды путем ее прокаливания при температурах 400-450 °С [7].

3. Третья форма вхождения воды в слюды относится к структурному элементу октаэдрической сетки к группе  $(OH)^-$ . Гидроксилы, строго говоря, не являются молекулами воды. Однако  $(OH)^-$  – составная часть молекулы  $H_2O$ , поэтому традиционно рас-

смаатривают его как фактор структурной гидратации, более точно, говорят о гидратации в форме гидроксилации.

Степень гидратации можно определить по потере массы кристалла слюды при ее прогревании. Первая часть потерь соответствует выходу примесной воды (до 250 °С). Далее при  $T > 400$  °С наблюдается потеря массы вследствие выхода молекулярной воды из межслоевого промежутка. При  $T > 800$  °С начинается этап термического разрушения кристалла. Потеря массы не столь значимая, как в предыдущих двух случаях, но достаточно уверенно фиксируется стандартными методами дифференциально-термического анализа (ДТА) [8]. Для определения структурных изменений слюд при нагревании до температуры дегидроксилации были использованы стандартные методы высокотемпературной рентгеновской дифрактометрии [7]. Точечная группа слюд содержит центр симметрии, следовательно, структурной амплитудой этих кристаллов являются действительные числа. Нами строились плоские проекции (рефлексы  $hk0$ ) и линейные проекции на ось  $Z$  (рефлексы  $00l$ )  $\rho(x, y)$  и  $\rho(z)$  соответственно. В таблице 1 приведены значения структурных амплитуд для кристаллов мусковита. Структурные амплитуды указаны в условных единицах, нормированы по одинаковой сумме. Расчеты проведены на основе функции:

$$\rho(xyz) = \sum_h \sum_k \sum_l F(hkl) \cos 2\pi(hx + ky + lz).$$

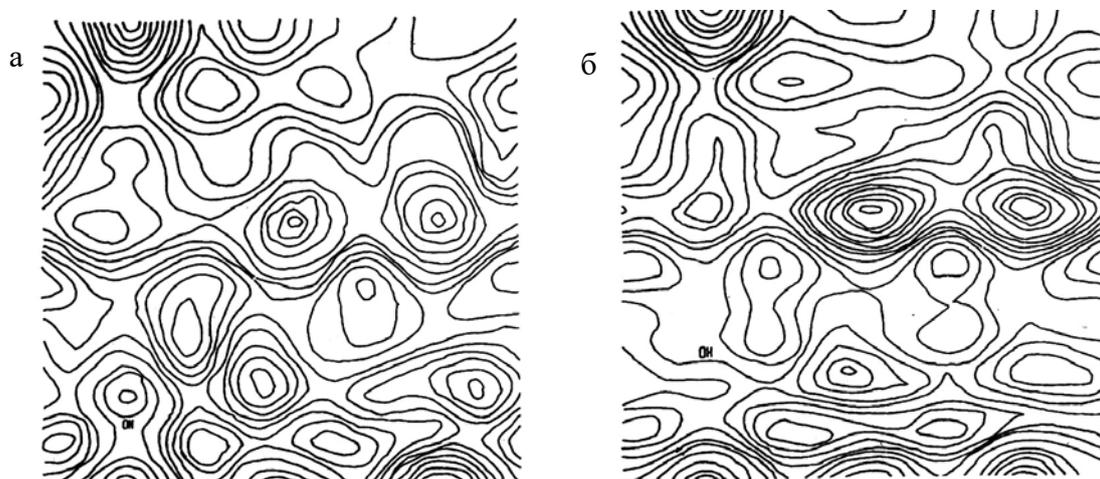
Таблица 1 – Экспериментальные значения структурных амплитуд  $F(hk0)$  в кристалле мусковита,  $F(1)$  – исходный образец,  $F(2)$  – образец, термообработанный при температуре 800 °С

$h$	$k$	$F(1)$	$F(2)$	$h$	$k$	$F(1)$	$F(2)$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	2	-1,9	-1,04	4	0	7,4	6,3
0	4	0,1	2,16	4	2	7,4	6,82
0	6	-11,4	-11,7	4	4	-2,3	0,5
0	8	-1,8	-0,3	4	6	-2,3	-3,12
0	10	-0,2	-1,31	4	8	-1	0,5
0	12	4,7	2,18	4	10	0,6	0,47
0	14	0,6	0,73	4	12	1,8	1,64
0	16	0,52	0,08	4	14	4	3,28
0	18	-2,4	-0,13	4	16	-0,15	-0,14
1	1	-11,5	-10,83	5	1	-1,15	0,34
1	3	-0,7	-1,57	5	3	0,7	2,45
1	5	1,4	2,54	5	5	-0,2	-0,31
1	7	1,5	2,68	5	7	0,9	-0,6
1	9	0,5	0,61	5	9	-0,2	-1,8
1	11	-0,4	-0,22	5	11	0,4	0,18
1	13	-0,5	-0,7	5	13	0,35	0,9
1	15	-2,2	-1,96	5	15	2,9	0,4
1	17	-0,01	-0,09	5	17	-0,3	-0,2
2	0	14,3	14,52	6	0	-0,4	-0,9
2	2	-1,9	-3,72	6	2	-2,8	-1,98
2	4	2,9	0,5	6	4	0,4	0,46

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
2	6	-7,5	-4,65	6	6	0,8	0,36
2	8	-0,4	0,2	6	8	0,5	0,04
2	10	-1,28	-1,1	6	10	0,3	0,76
2	12	2,47	1,47	6	12	-0,7	-1,13
2	14	0,3	1,4	6	14	-0,5	-1,06
2	16	0,8	0,6	6	16	-0,2	-1,08
2	18	-0,6	-0,2	6	18	-0,1	-0,65
3	1	-0,6	-1,9	7	1	0,7	0,5
3	3	-0,3	-0,82	7	3	-0,1	-0,04
3	5	0,3	1,62	7	5	-0,6	-0,5
3	7	0,3	0,14	7	7	-0,6	-1
3	9	0,4	1,26	7	9	-0,65	-2,5
3	11	0,2	0,7	7	11	0,7	0,94
3	13	-0,3	-0,22	7	13	0,1	0,3
3	15	-0,35	0,34	7	15	-0,2	-0,64
3	17	-0,1	-0,44	7	17	-0,45	-1

Проекция электронной плотности мусковита приведены на рисунке 1. Аналогичные исследования выполнены и для кристаллов флогопита.



а – исходный мусковит; б – после 150 часов прогрева при 850 °С

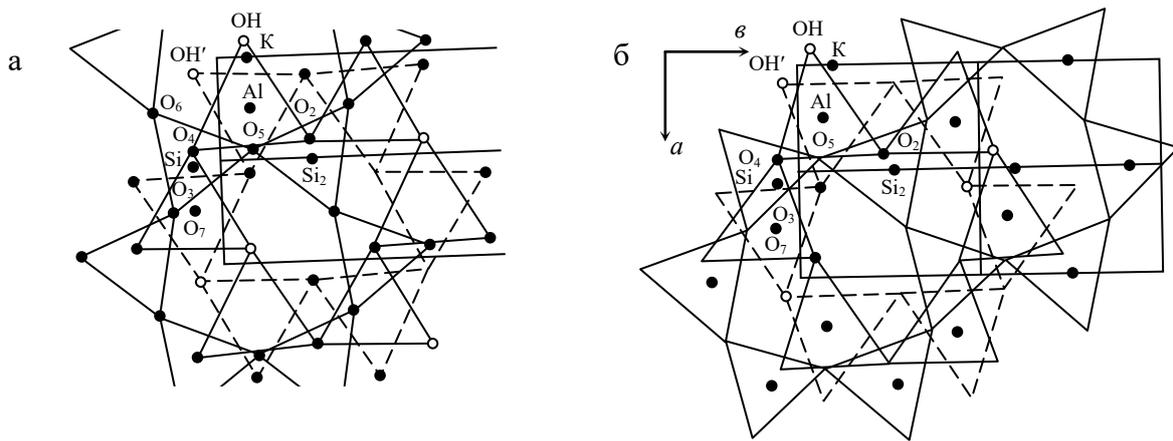
**Рисунок 1 – XY-проекция электронной плотности мусковита до и после прогрева**

Проекция электронной плотности  $\rho(x, y)$  позволили определить координаты атомов  $(x, y)$  в мусковите и флогопите до и после прогрева при высокой температуре (таблица 2).

По координатам атомов в таблице 2 построены схемы проекций функций  $\rho(x, y)$  мусковита и флогопита (рисунки 2, 3), обозначение атомов на рисунках те же, что в таблице 2.

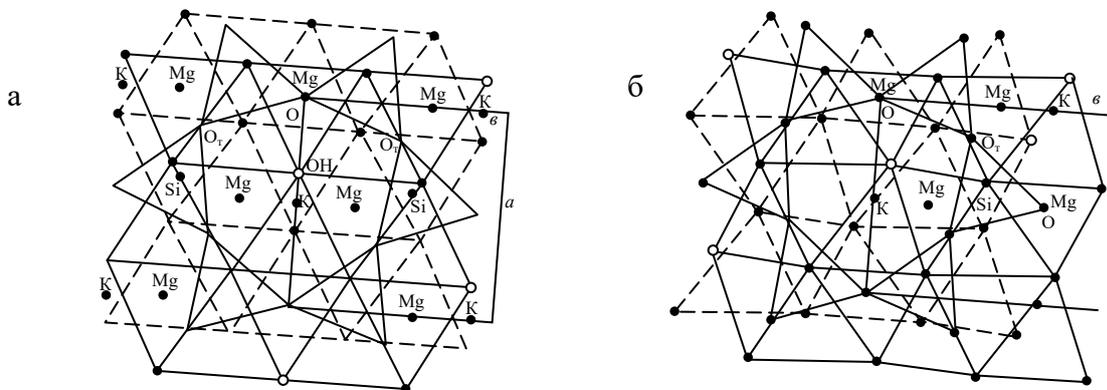
Таблица 2 – Координаты атомов в мусковите при различных температурах нагрева

Атом	при 20 °С		при 500 °С		при 800 °С		при 20 °С после 6-ти часового прогрева при 800 °С	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
K	0	0,09	0	0,9	0	0,10	0,09	0,25
OH	-0,06	0,07	-0,08	0,06	-0,09	0,04	0,04	0,25
Al	0,25	0,09	0,25	0,09	0,23	0,07	0,09	0,00
Si <sub>1</sub>	0,5	-0,07	0,50	-0,07	-0,50	-0,09	-0,07	0,13
Si <sub>2</sub>	0,50	0,26	0,50	0,26	0,50	0,26	0,25	0,13
O <sub>2</sub>	0,41	0,25	0,4	0,24	0,41	0,23	0,25	0,06
O <sub>4</sub>	0,44	0,08	0,50	-0,06	0,43	-0,06	-0,08	0,05
O <sub>5</sub>	0,44	0,09	0,46	0,08	0,43	0,06	0,09	0,17
O <sub>6</sub>	0,26	-0,19	0,27	-0,19	0,29	-0,21	-0,17	0,17
O <sub>7</sub>	0,76	-0,14	0,73	-0,14	0,76	-0,14	-0,15	-0,15



а – 20 °С; б – 800 °С; — верхние основания октаэдров; --- нижние основания октаэдров

Рисунок 2 – Экспериментальные проекции структуры мусковита плоскость ХУ



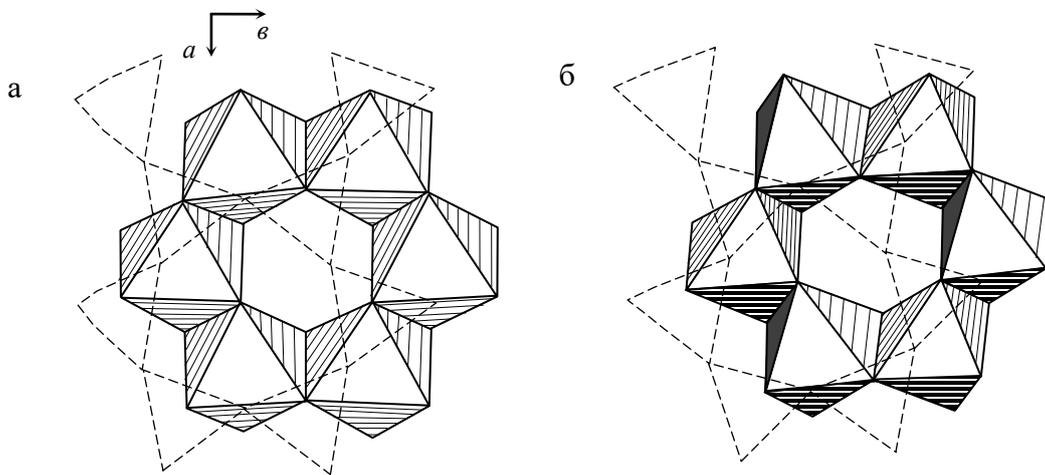
а – 20 °С; б – 800 °С; — верхние основания октаэдров; --- нижние основания октаэдров

Рисунок 3 – Экспериментальные проекции структуры флогопита плоскость ХУ

### Анализ структурных изменений в слюдах при их нагревании до высоких температур

Учитывая, что при  $T > 800$  °С у слюд наблюдается потеря массы, а при дальнейшем увеличении температуры кристалл начинает разрушаться, можно сделать вывод о происходящих в слюде процессах. При нагревании увеличивается энергия колебаний атомов. При этом возрастает диссоциация гидроксила. Ион водорода мигрирует по кристаллу, соединяется с другим гидроксилом, что приводит к возникновению нейтральной молекулы воды  $\text{OH}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$ .

Молекула воды обладает большим по величине дипольным моментом, но она электрически нейтральна. Ее связи в структурном октаэдре ослаблены, и молекула воды может выйти из октаэдрической сетки в межслоевой промежуток и, затем, покинуть кристалл. Проекция электронной плотности  $\rho(x, y)$  подтверждают справедливость этого предположения. На проекциях указано положение  $(\text{OH})^{-1}$  в исходном кристалле. В этой точке на проекции электронной плотности  $\rho(x, y)$  кристалла мусковита, термообработанного при  $T = 800$  °С, положение соответствующей группе  $(\text{OH})^{-1}$  исчезает. Часть структурных октаэдров преобразуется в гептаэдр. Искривление октаэдрической сетки приведет к развороту тетраэдров по сравнению с их первоначальными положениями. Их внешние основания создают гофрированную поверхность. Это хорошо видно на полиэдрических моделях мусковита и флогопита, для исходной и нагретой до 800 °С структур (рисунки 4, 5). Развороты тетраэдров и искажения в октаэдрической сетке приводят к возникновению механических напряжений. При дальнейшем прогреве число гептаэдров во внутреннем слое слюдяного блока возрастает, что приводит к увеличению механических напряжений. В конце концов, это обуславливает появление трещин. Кристалл начинает разрушаться [9].



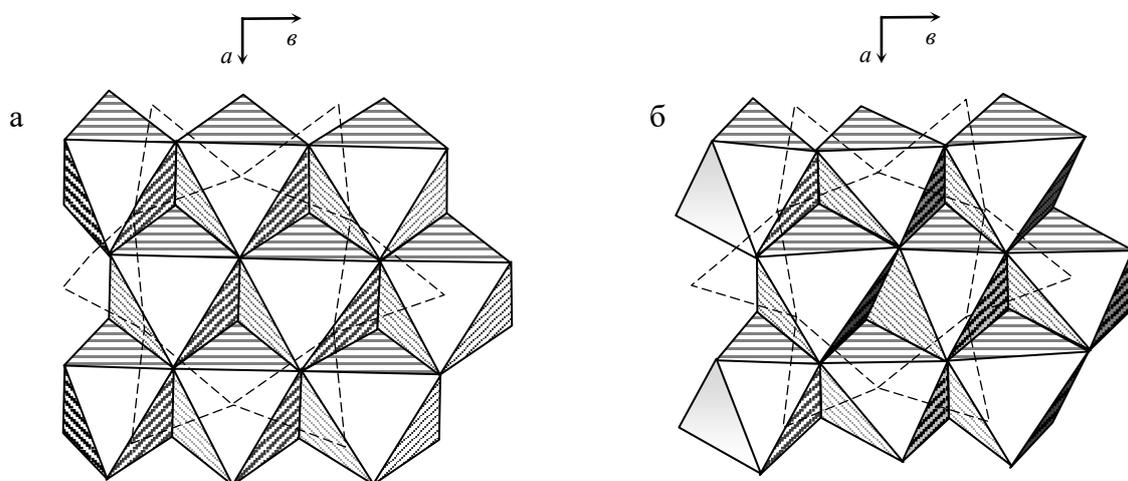
а – 20 °С; б – 800 °С

**Рисунок 4 – Полиэдрические структуры мусковита**

Так как заполнение октаэдрической сетки ди- и триоктаэдрических слюд различно, то характер изменения структуры при нагревании не совсем одинаков. В мусковитах петли, созданные основаниями тетраэдров, при нагревании становятся дитригональными, тогда как у флогопитов гексагональность сохраняется при более высоких, по сравнению с мусковитом, температурах.

Полученные результаты, на наш взгляд, представляют интерес как для создания высокотемпературных диэлектрических композиционных материалов с модификатора-

ми на основе слюды, так и при разработке технологий изготовления высокотемпературных машиностроительных композитов [3, 8].



а – 20 °С; б – 800 °С

Рисунок 5 – Полиэдрические структуры флогопита

### Заключение

Слоистые силикаты, как минералы склонные к изоморфизму, характеризуются большим числом разновидностей, многие из которых рассматриваются как самостоятельные, со своим названием, минералы. В то же время, эти минералы имеют общие структурные элементы, а именно – октаэдрическую сетку в двух кислородных слоях и примыкающие к этой сетке слои кислорода, формирующие тетраэдрическую сетку. Часть кислорода в этом слое отсутствует, что приводит к устранению октаэдров, оставшиеся тетраэдры имеют вершины общие с вершинами октаэдров. Блоки из тетраэдрических и октаэдрических сеток формируют все слоистые силикаты. В пределах блока межатомные взаимодействия носят валентный характер. Связь между блоками-слоями осуществляется Ван-дер-Ваальсовыми силами. Эти связи достаточно слабые, что и определяет совершенную спайность силикатов. В этих минералах возможны нарушения в межслоевом взаимодействии с образованием внутренних расслоений, которые обычно заполняются водой. Методами рентгеновской дифрактометрии исследованы структурные различия между слюдами при 20 °С и при 800 °С. Эффект выхода гидроксильной группы из октаэдрической сетки подтвержден экспериментально. При выходе  $(\text{OH})^{-1}$  из кристалла слюды кислородный октаэдр преобразуется в гептаэдр. Это приводит к искажению и в октаэдрической, и в тетраэдрической сетках. Возникают механические напряжения, которые увеличиваются с увеличением температуры нагрева, что приводит к растрескиванию, то есть к разрушению кристалла.

Результаты представляют интерес для работников, создающих строительные и машиностроительные материалы, особенно в тех случаях, когда в процессе их изготовления или работы требуется нагрев до высоких температур.

### Список использованных источников

1. **Тотурбиев, Б.Д.** Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций / Б.Д. Тотурбиев. – М.: Стройиздат, 1988. – 208 с.

2. Влияние граничных слоев воды на диэлектрические свойства и тепловое расширение кристаллов слюды / М.С. Мецик [и др.] // Физика и химия поверхности. – 1985. – № 1 – С. 90-95.
3. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
4. **Франк-Каменецкий, В.А.** Рентгенография основных типов породообразующих минералов / В.А. Франк-Каменецкий. – Л.: Недра, 1983. – 359 с.
5. Систематизация силикатных минералов, используемых при создании материалов различного назначения / В.А. Лиопо [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 82-90.
6. **Звягин, Б.Б.** Структурное моделирование слюд с неупорядоченным размещением изоморфных катионов / Б.Б. Звягин, В.А. Дриц // Минералогический журнал. – 1991. – № 5. – С. 84-96.
7. **Мецик, М.С.** Термические свойства кристаллов слюды / М.С. Мецик. – Иркутск: ИГУ, 1989. – 184 с.
8. Металлополимерные нанокомпозиты: особенности структуры, технология, применение / А.А. Рыскулов [и др.]. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 335 с.
9. Рентгенографическое исследование кристаллов флогопитов с различными термостойкостями / Г.А. Кузнецова [и др.] // Веснік ГрДУ. – 2013. – № 1. – С. 5-12.

---

**Liopo V.A., Auchynnikaу Ya.V., Sitkevich F.A.**

### **Transformation in high temperature silicate**

*The objects of the study were crystals of dioctahedral muscovite and phlogopite trioctahedral as typical representatives of a large group of phyllosilicates. Experimental methods of high-temperature X-ray diffraction were used. The structural amplitude reflections were determined, which were built flat  $\rho(x, y)$  and linear  $\rho(z)$  the projection of the electron density structure. It is found that at temperatures  $T \geq 800$  °C octahedral grid pattern formed by a molecule of water according to the following reaction  $\text{OH} + \text{OH} \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{2-}$ . Neutral water molecule leaves the crystal. Octahedron is transformed into heptaedr. Upper base tetrahedra create a corrugated surface. There are mechanical stresses, which increase with rising temperature. Crystal begins to crack and crumble. Thus, the formation of new crystalline silicate species is possible.*

Поступила в редакцию 06.05.2015 г.

УДК 621.7:621.217:678.033:537

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Эйсымонт Е.И.<sup>1</sup>, Григорьева Т.Ф.<sup>2</sup>, Бурцев А.Н.<sup>3</sup>, Овчинников Е.В.<sup>4</sup>, Авдейчик С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь

<sup>2</sup>Учреждение Российской академии наук Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь

<sup>4</sup>Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

*В статье рассмотрено влияние энергетического фактора, обусловленного технологическими воздействиями на компоненты, на процессы формирования материалов на основе термопластов. Показана эффективность механохимического совмещения полимера и дисперсного наполнителя при получении композитов с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик.*

### Введение

Современное машиностроение базируется на применении новых конструктивных решений, которые могут быть реализованы при использовании материалов с заданными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических, теплофизических и других служебных характеристик. Особую перспективу для совершенствования производимой автомобильной, сельскохозяйственной и горнодобывающей техники имеют функциональные композиционные материалы на основе термопластичных матриц, которые обладают возможностью регулирования параметров служебных характеристик в широком диапазоне значений, имеют развитую промышленную базу составляющих компонентов и высокопроизводительную технологию изготовления и переработки.

Согласно классическим представлениям материаловедения полимерных композитов важнейшим фактором, определяющим параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий, является интенсивность межфазного взаимодействия на границе раздела компонентов. Управляя механизмами и кинетикой межфазных взаимодействий в композите на основе термопластов различного состава, строения и молекулярной массы, возможно достижение оптимального значения прочности граничных слоев, при которой обеспечивается максимальный эффект модифицирования [1-5].

Для промышленного применения новых подходов к процессам управления межфазными взаимодействиями необходима разработка простых технологий, основанных на применении оборудования, широко распространенного в практике – смесителей, дробилок, дисмембраторов, термопластоавтоматов и др.

Анализ литературных источников, посвященных проблемам создания высокопрочных износостойких композиционных материалов на основе термопластичных матриц, свидетельствует о перспективности подхода, основанного на направленном изме-

нении энергетического состояния частиц компонентов, определяющего интенсивность их взаимодействия с образованием граничных слоев определенного состава, строения и прочности. Вместе с тем, номенклатура машиностроительных композитов, полученных с применением специальных энергетических воздействий на компоненты при изготовлении и переработке материалов, чрезвычайно ограничена, что не позволяет осуществлять их широкое практическое применение для создания и изготовления комплектующих деталей автокомпонентов и технологического оборудования различного назначения повышенного ресурса [1, 2, 6-8].

Цель работы состояла в установлении механизмов формирования особого энергетического состояния компонентов при различных видах технологических воздействий для обеспечения оптимальной структуры межфазных граничных слоев в наполненных термопластичных матрицах, которая определяет параметры служебных характеристик.

### Методика исследований

В качестве связующих для получения композитов использовали термопластичные полимеры – полиамид 6 (ПА 6), полиамид 11 (ПА 11), полиэтилен низкого давления (ПЭНД), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ) в состоянии промышленной поставки (ОАО «Гродно Азот», ОАО «Полимир», ОАО «Могилевхимволокно»). Отдельные эксперименты проводили с регенерированными термопластами (ПЭНД, ПП, ПЭВД), полученными на ОАО «Белворполимер» в соответствии с действующей нормативной документацией. Для формирования покрытий использовали дисперсные частицы термопластов, промышленные составы лакокрасочных материалов, выпускаемых ОАО «Лакокраска» (г. Лида, Беларусь), марок ПФ-266 (ТУ РБ 500021625.095-2001), МЛ-12 (ТУ РБ 00200454.089-2000), ЭП-1236 и ЭП-1267 (ТУ 2313-122.00209711-02) и их аналоги, производимые на предприятиях РФ (г. Хотьково).

Для формирования многослойных покрытий и модифицирования компонентов при различных видах технологического воздействия использовали фторсодержащие соединения – растворы фторсодержащих олигомеров «Эпилам», «Фолеокс» с молекулярной массой 1000 – 2000 ед. марок Ф-1, Ф-14 и др. (производитель – Институт синтетического каучука им. Лебедева, г. Санкт-Петербург, Россия), и продукты термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена, производимые под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток, Россия).

Для управления параметрами энергетического состояния и дисперсности компонентов использовали технологические приемы, основанные на механическом диспергировании, механохимическом совмещении, воздействии энергетических потоков при термообработке, воздействии коронного разряда, СВЧ-излучения, лазерного излучения с использованием оригинальных установок криогенного диспергирования, вальцевания со сдвигом (УО «ГрГУ им. Янки Купалы»), установки планетарного смешивания АГО-2 (Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН), установки для обработки СВЧ-излучением, лазера КВАНТ-15, высокоэнергетического измельчителя, дисмембратора, установок для нанесения электростатических покрытий (ОАО «Гродненский механический завод», ОАО «Белкард», ОАО «Лакокраска», ГНУ «ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси»). Выбор типа энергетического воздействия и режимов для осуществления процесса активации был обусловлен структурно-химическими и размерными параметрами компонентов, функциональным назначением покрытий или изделий.

Для получения композиционных материалов использовали высокодисперсные, в том числе наноразмерные частицы, углеродсодержащих (УДА, УДАГ, нанотрубки, коллоидный графит, ТРГ), кремнийсодержащих (слюды, глины, кремень, шунгит, тре-

пел), фторсодержащих (УПТФЭ) и металлсодержащих (оксиды Fe, Cu, Zn) соединений, полученных по оригинальным технологиям производителя (ЗАО «Синта», ГНУ «Институт теплообмена им. Лыкова НАН Беларуси», Институт химии ДВО РАН) или в результате специальных технологических воздействий на полуфабрикат (механохимического диспергирования, сублимации).

Физико-химические процессы на границе раздела фаз «матрица-наполнитель», «покрытие-субстрат» при получении, переработке композитов и покрытий и эксплуатации изделий оценивали с использованием методов ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (ДРОН 2,0, ДРОН 3,0), ДТА (Thermoscan-2) по общепринятым методикам. Морфологические параметры частиц и субстратов, подвергнутых различным видам энергетического воздействия, исследовали с применением атомно-силового (NT-206), растрового электронного (Mira, Tescan), оптического (MDS) микроскопов. Энергетическое состояние дисперсных частиц, образцов композитов, покрытий и субстратов исследовали методом термостимулированных токов (ТСТ-анализа) на оригинальной установке (ОДО «Микротестмашины»).

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и защитных характеристик материалов и покрытий определяли по общепринятым методикам в соответствии с действующими стандартами РБ или нормативной документацией, разработанной потребителями продукции.

Стендовые испытания изделий и покрытий проводили на ОАО «Белкард», ОАО «БелТАПАЗ», ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», ПУЧП «Цветлит», ОАО «Белвкторполимер».

Обработку экспериментальных данных осуществляли с применением программных продуктов «Statistica».

### Результаты и обсуждение

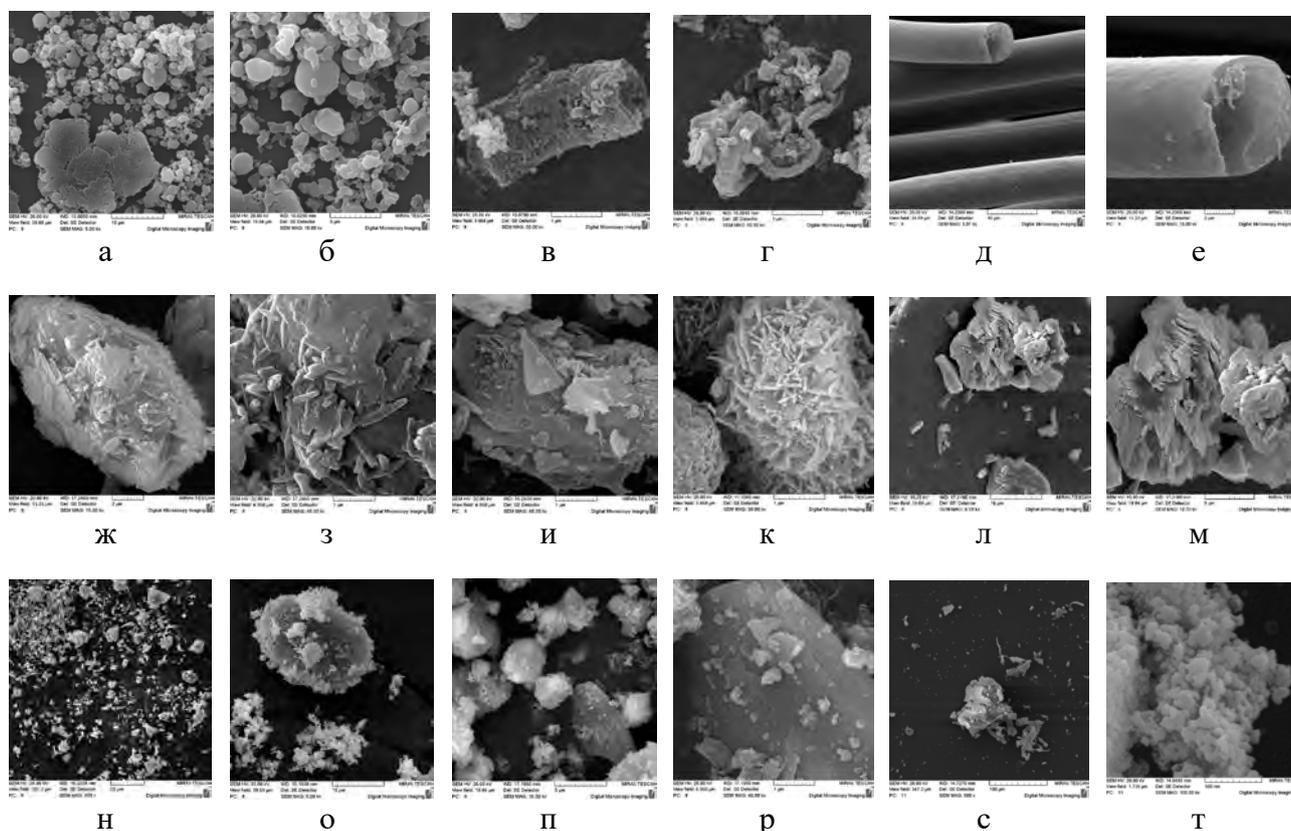
Используемые в материаловедении композиционные материалы на основе полимерных, олигомерных и совмещенных матриц дисперсные модификаторы, различаются не только по составу, кристаллохимическому строению и геометрическим размерам (дисперсности), но и энергетическому состоянию, которое определяет их активность в процессах межфазных взаимодействий [1, 3, 6, 9-11].

Энергетическое состояние дисперсной частицы или субстрата является многофакторной величиной, зависящей от величины поверхностной энергии, механизма образования нескомпенсированного заряда, времени его релаксации в условиях воздействия различных физико-химических, электрофизических, тепловых и других процессов.

При обоснованном выборе компонентов функциональных материалов и металлополимерных систем необходимо не только обеспечить заданный уровень активности в процессах межфазного взаимодействия компонентов, но и его проявление в условиях формирования композита (системы) в оптимальном диапазоне параметров технологических факторов. Поэтому в каждом конкретном технологическом процессе необходимо обоснование вида и механизма энергетического воздействия на компоненты, которое обусловит формирование граничного слоя с оптимальными параметрами адгезионных, триботехнических, деформационно-прочностных, теплофизических и др. характеристик, определяющих заданный служебный ресурс изделия или конструкции.

Рассмотрено влияние распространенных видов технологических воздействий – термического, лазерного, механохимического, ультразвукового на параметры морфологии и энергетического состояния дисперсных частиц и покрытий, полученных из природных и синтетических полуфабрикатов – глины, кремня, шунгита, трепела, фрагментов УВ, ПА 6, ПТФЭ, полиолефинов (ПЭНД, ПП, СЭВА), полиэфира ПЭТФ и др.

Анализ морфологии поверхностного слоя, единичных частиц, полученных при использовании различных технологических воздействий и геохимических факторов, свидетельствует о наличии наноразмерных элементов сферического, висцерного и пластинчатого габитуса (рисунок 1).

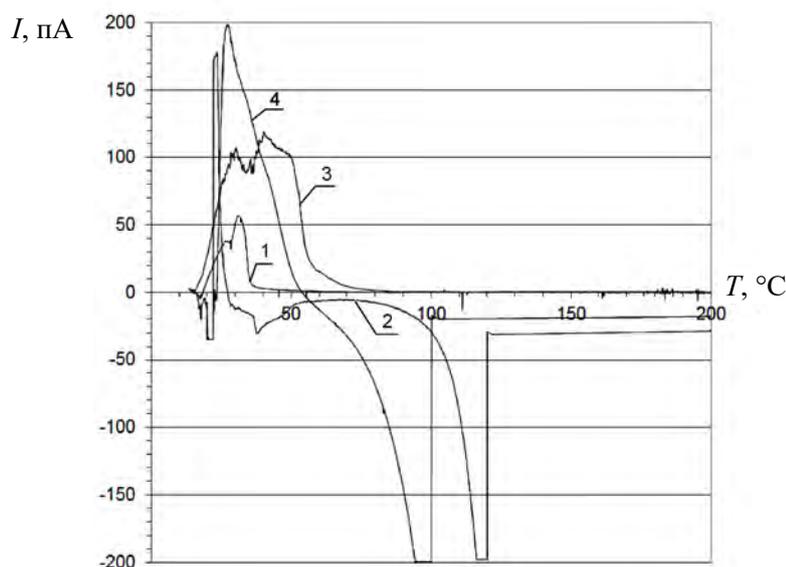


а, б – ультрадисперсный ПТФЭ; в, г – углеродные нанотрубки; д, е – УВ; ж, з – глины; и, к – трепел; л, м – стекло; н, о – продукты металлургического производства; п, р – шунгит; с, т – криогенно измельченный ПА 6

**Рисунок 1 – Характерная морфология дисперсных модификаторов полимерных матриц**

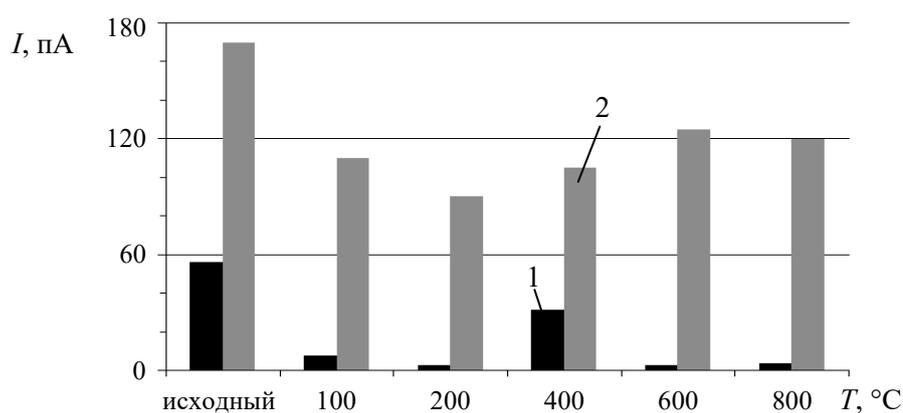
Наличие таких наноразмерных элементов в соответствии с современными представлениями физики конденсированного состояния и квантовой физики, обуславливает особое энергетическое состояние поверхностного слоя, характеризуемое понятием «наносостояние» [10-15]. Очевидно, что кинетика и механизмы межфазных процессов в высокомолекулярных матрицах, модифицированных активными частицами, зависят от параметров энергетического состояния и его влияния на структуру граничных слоев при воздействии технологических факторов формирования композита.

Анализ энергетического состояния дисперсных частиц различного состава, технологической предыстории и строения по критерию термостимулированных токов (ТСТ) свидетельствует о наличии предпосылок воздействия на структуру граничных слоев, определяемых температурой (рисунок 2), при которой проявляется эффект «наносостояния», обусловленный наличием наноразмерных элементов на поверхности модификатора.



Дисперсность частиц 100-200 мкм;  
 1 – кремний; 2 – шунгит; 3 – трепел; 4 – углеродные нанотрубки  
**Рисунок 2 – Спектры ТСТ дисперсных частиц**

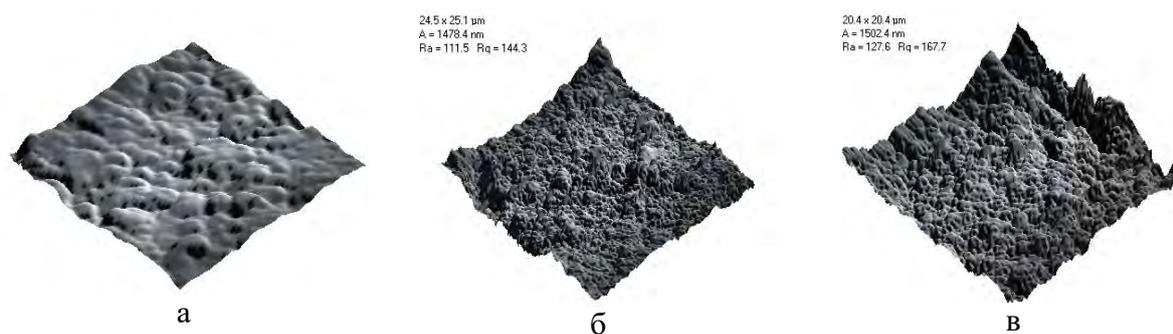
Другим фактором, определяющим активность частицы, является интенсивность энергетического воздействия (теплового, механического, лазерного, ионизирующего и др.) на полуфабрикат или субстрат, которая определяет механизмы десорбции, дегидратации, дегидроксиляции, окисления, деструкции и других процессов, изменяющих концентрацию носителей заряда различного типа. Например, при предварительной термообработке частиц распространенных модификаторов полимерных матриц шунгита и кремния в диапазоне температур 100-800 °С существенно изменяется значение параметра ТСТ  $I$ , пА (рисунок 3). Характерной особенностью энергетического воздействия является изменение исходной морфологии поверхностного слоя дисперсных частиц.



Дисперсность частиц 50-100 мкм; 1 – кремний; 2 – шунгит  
**Рисунок 3 – Зависимость величины максимального ТСТ  $I_{\max}$  от температуры обработки дисперсных частиц кремния, шунгита**

Анализ морфологии поверхностного слоя дисперсных частиц, полученных диспергированием различных полуфабрикатов путем энергетического воздействия различ-

ного вида (термического, механического, лазерного), свидетельствует о наличии характерных признаков, обуславливающих активность в межфазных взаимодействиях. Для природных углеродсодержащих полуфабрикатов (окисленный графит, шунгит) характерно образование относительно гладкого поверхностного слоя с наноразмерной шероховатостью. Синтетические углеродные частицы (углеродные нанотрубки, углеродные волокна) обладают поверхностным слоем, сформированным из глобулярных фрагментов и достаточно высокой дефектностью. Силикатсодержащие частицы (кремний, стекло, трепел, глина) практически не изменяют исходные параметры шероховатости после термической обработки (рисунок 4).



а – кремний; б – глина; в – шунгит

**Рисунок 4 – Характерная морфология дисперсных частиц, подвергнутых термической обработке в диапазоне температур 250–450 °С**

Воздействие концентрированным потоком лазерного излучения позволяет получить частицы с развитым рельефом как при использовании полимерных органических (ПТФЭ, ПЭНД, ПЭТФ), так и углеродсодержащих (УВ, шунгит, электродный графит) и кремнийсодержащих (кремний, стекло) полуфабрикатов. При этом установлено влияние вида энергетического воздействия на энергетическое состояние дисперсных частиц. Энергетические параметры, характеризующиеся величиной ТСТ, при объемном термическом воздействии снижаются (рисунок 3), а при концентрированном (локальном) воздействии – увеличиваются. Данный фактор свидетельствует о необходимости при обосновании технологических режимов изготовления композиционных материалов и их переработки в изделия учета фактора морфологии и энергетического состояния для оптимизации условий интенсивного межфазного взаимодействия компонентов на различных структурных уровнях. Установлены общие закономерности формирования активного состояния дисперсных частиц модификаторов, которые обусловлены сочетанием кристаллохимических предпосылок и морфологии поверхностного слоя. Выбор вида активирующего энергетического воздействия зависит не только от особенностей состава и строения модификатора, но и от проявления наиболее эффективного действия непосредственно в процессе формирования композиционного материала (изделия) при заданных параметрах воздействия технологических факторов. Поэтому оптимальным модифицирующим действием обладают компоненты с развитой морфологией поверхностного слоя, у которых энергетические параметры зависят не только от структуры, но и от геометрических размеров фрагментов, обуславливающих возможность реализации наносостояния.

К числу наиболее эффективных направлений реализации энергетического фактора оптимизации структуры полимерных композитов относится технология механохимических (трибохимических) воздействий, при которой возможно образование про-

дуктов межфазного взаимодействия с граничным слоем, образованным активными фрагментами полимерной матрицы и модификатора [1, 3-6, 16-18].

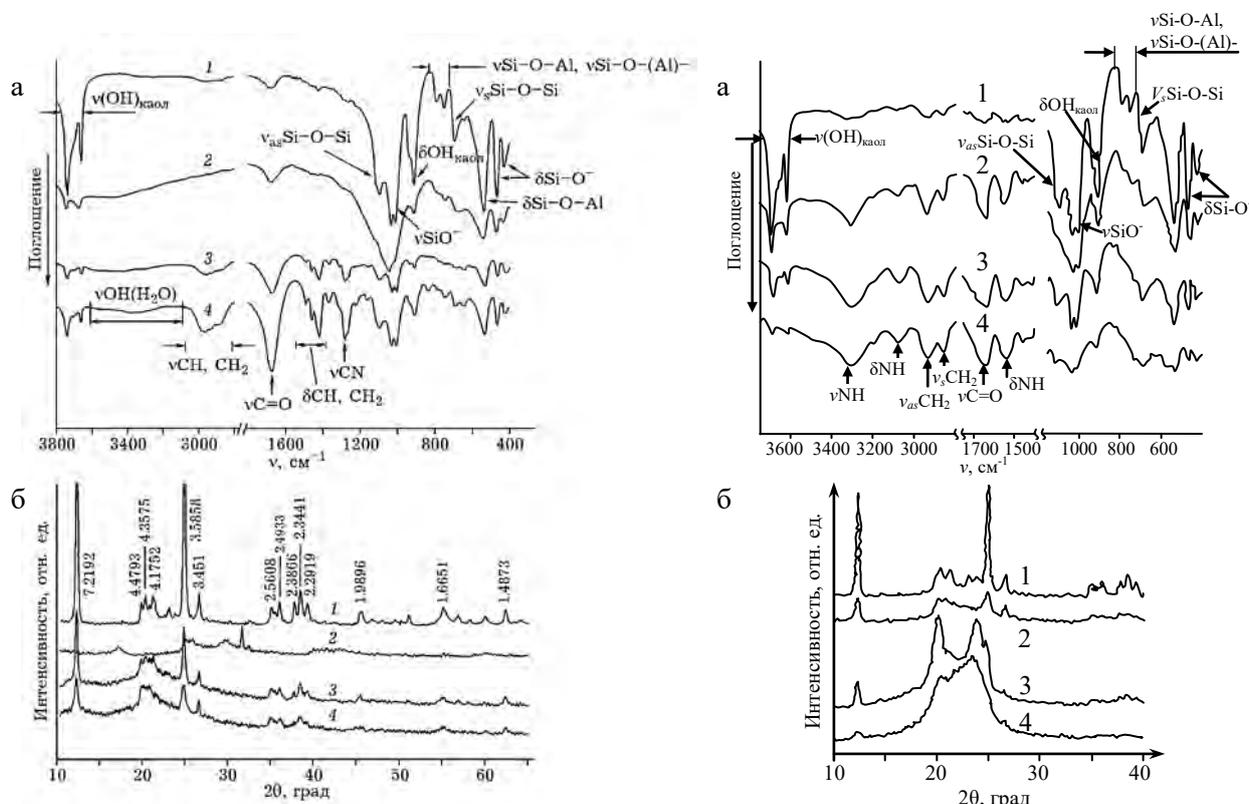
Особенности механохимической активации состоят в том, что независимо от исходного строения компонентов, их кристаллохимической структуры и энергетического состояния при одновременном воздействии механических напряжений разного типа (сжатия, сдвига, кручения) создаются условия не только для изменения морфологии поверхностного слоя обоих компонентов с образованием наиболее развитого слоя, но и для адсорбционного, в том числе хемосорбционного, взаимодействия активных фрагментов различного вида и строения (квантовых точек, радикальных продуктов механодеструкции, дефектов кристаллической решетки, дефектов состава (примесей) и т.п.). При этом в условиях совместной механохимической активации становится вторичным фактор устойчивости (стабильности) активного состояния, обусловленного наличием электрнетного заряда, нескомпенсированных электронов у радикальных фрагментов, ювенильных поверхностей и других предпосылок, и времени его релаксации. Одновременное воздействие различных механических напряжений на смесь компонентов позволяет реализовать механизмы твердофазных взаимодействий с образованием нестехиометрических продуктов, которые не могут быть образованы по реакциям классического обмена и присоединения.

Классические представления механохимии конденсированных сред, а также исследования в области трибохимии металлополимерных систем позволили обосновать целесообразность использования технологии совместной механоактивации для подготовки компонентов функциональных материалов на основе термопластичных матриц (ПА 6, ПЭНД, ПП, СЭВА, ПТФЭ) [1, 16-18]. При традиционном измельчении термопластичных полуфабрикатов истиранием, дроблением при комнатных и криогенных температурах образуются продукты с активным состоянием, характеризваемым небольшим временем релаксации вследствие протекания адсорбционных процессов компонентов окружающей среды. Механохимическое активирование смеси компонентов в установках ударного действия (мельницы АГО, установки для криогенного диспергирования) или тангенциального действия (валцы с регулируемым зазором) позволяет обеспечить эффективное межфазное взаимодействие образующихся продуктов диспергирования вплоть до образования хемосорбционных связей в граничных слоях.

Модельные исследования эффективности механохимического активирования (МА) смесей компонентов были проведены на дисперсных порошках термопластичных полимеров различного состава, строения, кристалличности и гигроскопичности (севилен, ПП, ПА 6, поли-N-винилпирролидон ПВП) и кремнийсодержащих модификаторах, нашедших широкое применение в материаловедении полимерных композитов, в том числе наноматериалов (каолинит, кремень,  $\text{SiO}_2$ ). Обработку смеси компонентов проводили в высокоэнергетической мельнице ударного типа АГО-2 при действии ускорения в диапазоне значений 20-60 g в течение 1-4 мин. Методом ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа (рисунки 5, 6) установлено, что при совместной активации СЭВА, ПВП и каолинита осуществляется взаимодействие за счет неподеленной пары электронов полимера и активных центров кислотного характера на ювенильных поверхностях каолинита.

Аналогичные результаты получены и при совместной МА других смесей – ПЭНД, ПП, ПТФЭ с кремнийсодержащими и углеродсодержащими компонентами (кремень,  $\text{SiO}_2$ , УВ), что свидетельствует об общности механизмов межфазного взаимодействия активных фрагментов, образующихся вследствие действия механизма напряжений и приводящих к разрушению исходной структуры и образованию активных фрагментов, способных к рекомбинации. Особый интерес представляют композиты,

полученные механохимическим совмещением ПА 6 с функциональными компонентами, которые целесообразно использовать как для изготовления изделий с повышенными параметрами деформационно-прочностных характеристик, так и триботехнических покрытий.



1, 2 – содержание полимера в смеси 30 мас. %;  
3, 4 – содержание полимера 80 мас. %

**Рисунок 5 – ИК-спектры (а) и дифрактограммы (б) смесей каолинита с ПВА до (1, 3) и после МА в течение 4 мин (2, 4)**

1, 2 – содержание полимера в смеси 30 мас. %; 3, 4 – содержание полимера 80 мас. %

**Рисунок 6 – ИК-спектры (а) и дифрактограммы (б) смесей каолинита с ПА 6 до (1, 3) и после МА в течение 4 мин (2, 4)**

В качестве объектов исследований применяли порошок ПА 6 структурной формулой  $-(NH-[CH_2]_5-CO)-_n$  с размером единичных частиц 80-200 мкм. Для модифицирования применяли слоистый силикат – каолинит  $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ . Механическую активацию проводили в шаровой мельнице планетарного типа марки АГО-2 с водяным охлаждением.

В процессе механохимического совмещения компонентов возможно протекание межфазных процессов, приводящих к образованию граничных слоев повышенной прочности. Действительно, в ИК-спектрах смеси полиамид (30 мас. % + каолинит) после механической активации в течение 4 мин, как и в случае механической активации чистого каолинита, наблюдается уменьшение интенсивности полос валентных и деформационных колебаний связей:  $\nu, \delta (Al)-OH$ ;  $\nu, \delta Si-O-(Al), Si-O-Al$  соответственно области  $3800-3600\text{ см}^{-1}$ ,  $950-850\text{ см}^{-1}$ ,  $850-780\text{ см}^{-1}$  и с максимумом  $545\text{ см}^{-1}$  (рисунок 6а).

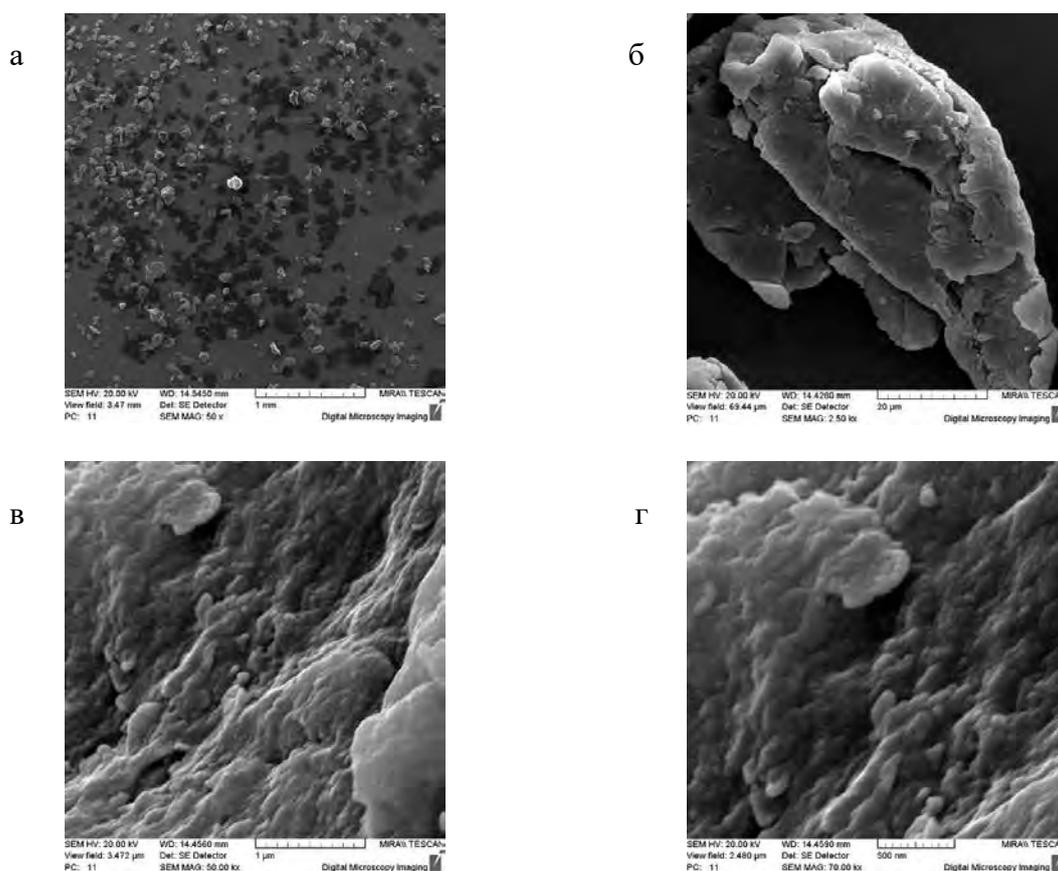
На дифрактограмме полимерного композита основные рефлексы каолинита сохраняются, уменьшается лишь их интенсивность:  $d_1 = 7,17$  ( $I/I_s = 100$ ),  $d_2 = 3,57$  ( $I/I_s = 80$ ) и  $d_3 = 3,37$  ( $I/I_s = 35$ ). Рефлексы полиамида налагаются на серию рефлексов каолинита в

области  $d = 4,47-3,74$ , поэтому нельзя судить о каких-либо изменениях параметров рефлексов полиамида (рисунок 6б).

При увеличении содержания полиамида в смеси, например, до 60 %, картина изменений полос каолинита и полиамида в ИКС после механической активации 4 мин становится совершенно иной. После активации не исчезают полосы, соответствующие колебаниям  $\nu_{as}$  и  $\nu_s$  Si-O-Si связей тетраэдров кремнекислородного каркаса, область  $1150-1050 \text{ см}^{-1}$  и с максимумом  $685 \text{ см}^{-1}$ . Происходит лишь уменьшение интенсивностей и уширение всех полос каолинита. Не наблюдается смещения полос полимера, так же как и появления новых полос. В данном случае происходит, по-видимому, постепенная аморфизация каолинита. Однако в присутствии полимера разрушение структуры силиката происходит не так активно. На дифрактограмме такого образца имеются очень слабые, но четкие рефлексы от базальных плоскостей каолинита: (001),  $d_1 = 7,17$  и (002)  $d_2 = 3,57$  (рисунок 6б).

Рефлексы полиамида уширяются и сливаются в один с двумя максимумами  $d_1 = 4,4$  и  $d_2 = 3,7$ , что свидетельствует об определенных изменениях структуры полимера.

Механоактивированные частицы смеси «полиамид-каолинит» характеризуются развитой морфологией, что, скорее всего, должно отражаться на активности данной системы (рисунок 7). Исходя из полученных методом растровой электронной микроскопии данных, в поверхностном слое наблюдается наличие наноразмерных фрагментов латеральным размером 20-50 нм (рисунок 7в, 7г).



**Рисунок 7 – Морфология частиц ПА 6 и каолинита исходных (а, б) и механоактивированных в течение 4 мин при ускорении 60 г (в, г)**

Введение данной механоактивированной смеси в полиамидную матрицу должно приводить к изменению параметров физико-механических характеристик полимерной матрицы. Использование данной системы имеет преимущества в сравнении с механоактивированными частицами металлов, силикатов, оксидов металлов и т.п., т.к. наличие привитого граничного слоя к силикатной частице повышает термодинамическую совместимость с базовой полиамидной матрицей.

Введение в полиамидную матрицу механоактивированных частиц приводит к изменению параметров деформационно-прочностных характеристик композиционного материала. В таблице 1 приведены параметры физико-механических характеристик ПА 6, модифицированного механоактивированной смесью «ПА 6-каолинит».

Таблица 1 – Физико-механические характеристики ПА 6, модифицированного механоактивированными частицами «ПА 6-каолинит»

Параметры	Исходный материал	Концентрация модификатора		
		0,5 %	2 %	5 %
Физический предел текучести, МПа	30,6	49,5	28,3	16,2
Деформация при физическом пределе текучести, %	19,85	6,9	4,2	4,9
Прочность при максимальном усилии, МПа	48,6	77,6	30,2	37,6
Деформация при максимальном усилии, %	133,4	81,6	5,6	9,2
Прочность при разрушении, МПа	48,6	77,6	30,2	37,6
Деформация при разрушении, %	133,4	81,6	5,6	9,16

Полученные результаты позволили оптимизировать составы композиционных материалов на базе ПА 6, модифицированного механоактивированными частицами «полиамид-каолинит», применяемых для нанесения триботехнических покрытий.

Проведенные исследования по влиянию энергетического фактора в технологии функциональных композиционных материалов на основе термопластичных матриц позволили разработать составы для применения в конструкциях машин, механизмов и технологического оборудования с повышенным эксплуатационным ресурсом.

Для разработки композиционных материалов для нанесения триботехнических покрытий использовали полимерные термопластичные матрицы, выпускаемые многотоннажно, в том числе отечественными производителями – ПА 6, ПЭНД, ПП. Модифицирование матричных полимеров функциональными компонентами (трепел, кремь, каолинит, УПТФЭ, ПЭНД) осуществляли методом МА с последующим измельчением при криогенных температурах ( $-198\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Покрытия формировали методом псевдооживленного слоя с применением оригинальных установок ГНУ ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. Сравнительные исследования (таблица 2) свидетельствуют о том, что разработанные составы не только не уступают импортному аналогу ПА 11 («Rilsan», Франция), но и существенно его превосходят по износостойкости. При этом, разработанные на основе отечественного ПА 6 (ОАО «Гродно Азот») составы композиционных материалов имеют стоимость в 3-5 раз более низкую, чем импортный аналог. Составы композитов с механоактивированными компонентами прошли успешные испытания в конструкциях карданных валов грузовых автомобилей, токарных патронов, производимых на ОАО «Белкард» и ОАО «БелТАПАЗ». На разработанные составы подана заявка на получение патента РБ на изобретение (№ а 20121816).

Установленные особенности изменения энергетического состояния полимерных частиц и субстратов, подвергнутых различным видам технологических воздействий

(термическому, лазерному), позволили разработать рекомендации для их использования в качестве компонентов биологически активных добавок и бактерицидных элементов изделий медицинского назначения.

Таблица 2 – Характеристики композиционных материалов для триботехнических покрытий (заявка на получение патента № а 20121816)

Характеристика	ПА 11 «Rilsan», Франция	ПА 6, ОАО «Гродно Азот»	Разработан- ный состав
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	43	50	67-78
Адгезионная прочность, см, не менее	20	15	27-32
Твердость по Бринеллю, МПа	90	100	89-94
Коэффициент трения	0,05-0,2	0,15-0,25	0,10-0,15

При использовании технологии МА получены слоистые композиты, в которых природный силикат (тальк) выступает в роли носителя, а биологически активный компонент в виде органических кислот и солей (янтарная кислота, сукцинат натрия, сукцинат хитозана, стеарат натрия и др.) имеет химически связанную с носителем форму. Составы МА компонентов могут быть использованы при получении лекарственных препаратов и биологически активных добавок многофункционального действия экологически чистым способом [18].

Высокоэнергетическое воздействие на дисперсные компоненты (шунгит) или полимерные изделия (термическое или лазерное) обеспечивает образование нескомпенсированного заряда с большим временем релаксации, наличие которого препятствует развитию патогенной среды *E. coli*, *Salm. enteridis*, *St. aureus*. Полученные результаты расширяют номенклатуру технологических приемов для повышения бактерицидных свойств изделий из полимерных материалов, основанных на придании компонентам особого энергетического состояния, и могут быть использованы для изготовления изделий из композиционных материалов, применяемых в лечебной практике.

Активность дисперсных частиц, подвергнутых энергетическим воздействиям, проявляющаяся в развитой морфологии поверхностного слоя и наличии нескомпенсированного заряда с большим временем релаксации, позволила разработать эффективные составы смазочных масел и пластичных смазок для тяжело нагруженных узлов трения на основе промышленных продуктов (МС-20, И-5, ЦИАТИМ-201, Литол-24, Ит-мол). При введении высокодисперсных частиц, активированных термическим, лазерным или механохимическим воздействием, в смазочном составе формируются зарядовые кластеры, способствующие повышению нагрузочной способности и тепловой устойчивости разделительных слоев в зоне фрикционного контакта. Разработаны составы смазочных масел, гидравлических жидкостей и пластичных смазок для применения в конструкциях автокомпонентов (тормозных камер, карданных валов), токарных патронов для металлообрабатывающего оборудования, узлах трения ленточных конвейеров. Введение в базовый состав наноразмерных продуктов, полученных лазерной или термической абляцией ПТФЭ в сочетании с активированными силикатсодержащими частицами ( $\text{SiO}_2$ , кремень), позволяет стабилизировать вязкость амортизирующей жидкости на основе минеральных масел в диапазоне температур 25-80 °С, увеличивает стойкость к заеданию узла привода токарного патрона в 1,5-2,0 раза, а также – ресурс игольчатого подшипника крестовины карданного вала грузовых автомобилей МАЗ, БелАЗ,

КАМАЗ и ресурс подшипников роликоопоры. Разработанные составы прошли апробирование на ведущих предприятиях Гродненского региона (ОАО «Белкард», ОАО «БелТАПАЗ») и рекомендованы к внедрению.

На разработанные составы композиционных материалов и смазочных сред разработана нормативная техническая документация, регламентирующая применение их в узлах трения, конструкциях автокомпонентов и ленточных конвейеров (технические условия ТУ ВУ 500013879.001-2011, ТУ ВУ 500013879.003-2012). Расчетный эффект от применения импортозамещающих покрытий на основе ПА 6, модифицированного активированными компонентами, составляет не менее 350 тысяч белорусских рублей на карданный вал. В 2012-2013 гг. в рамках выполнения проекта «Разработка импортозамещающего состава и технологии композиционных материалов для шлицевых соединений карданных валов и выпуск опытно-промышленной партии втулок с покрытием» для ОАО «Белкард» изготовлена опытная партия комплектующих элементов с покрытиями в количестве 4000 штук.

На ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» изготовлена опытная партия ленточных конвейеров с металлополимерными опорными роликами, в конструкции которых использованы композиционные материалы на основе регенерированных полиолефинов и активных дисперсных модификаторов. Производство опытной партии трубных заготовок для изготовления металлополимерных роликов организовано на ОАО «Белвторполимер».

### Заключение

Проведены системные исследования влияния вида технологического воздействия на параметры морфологии, геометрических характеристик и энергетического состояния дисперсных частиц и тонких пленок из органических и неорганических углеродсодержащих, кремнийсодержащих и фторсодержащих полуфабрикатов. Обоснован выбор технологии активации компонентов функциональных материалов и металлополимерных систем, обеспечивающий эффективное межфазное взаимодействие и достижение оптимальных параметров деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и защитных характеристик изделий и покрытий, применяемых при создании конструкций автокомпонентов, технологической оснастки, ленточных конвейеров, запорной и регулирующей арматуры для предприятий химической, перерабатывающей промышленности и машиностроения.

Исследованы особенности морфологии и энергетического состояния дисперсных частиц углеродсодержащих и кремнийсодержащих полуфабрикатов (шунгит, трепел, кремень, электродный графит, политетрафторэтилен, полиэтилен и др.), полученных при технологических воздействиях с различной энергией. Установлен факт образования преобладающей формы и активного состояния дисперсных частиц, обусловленного протеканием процесса разрушения кристаллохимической решетки или молекулярной структуры, который приводит к локализации носителей заряда в поверхностных слоях частицы с развитым строением и повышению ее способности к адсорбционному взаимодействию с полимерными, олигомерными матрицами и фрагментами их деструкции, образующимися при воздействии энергетических факторов (тепловых, лазерных, механических).

Установлен механизм межфазных взаимодействий при совместной механической активации дисперсных частиц термопластичных полимеров (ПА 6, ПП, СЭВА, ПТФЭ) и силикатсодержащих модификаторов комплексным воздействием механических напряжений (МА), состоящий в образовании хемосорбционных связей по месту

активных центров полимерных радикалов и поверхностного слоя силикатсодержащей частицы (каолинит, оксид кремния, кремь). Установлена возможность механохимических взаимодействий дисперсных частиц слоистых силикатов, органических кислот или их солей (янтарной, бензойной, стеаратами и бензоатом натрия и др.) при проведении МА с образованием слоистых композитов, в которых природный силикат является носителем привитого органического компонента. Показана целесообразность применения механоактивированных компонентов для получения композиционных материалов с повышенными параметрами служебных характеристик.

Разработаны составы смазочных масел, гидравлических жидкостей и пластичных смазок с регулируемыми параметрами реологических и триботехнических характеристик. Установлено, что при введении в состав смазочной основы дисперсных модификаторов, активированных термическим, лазерным или механическим воздействием, образуются зарядовые кластеры, увеличивающие стабильность реологических характеристик в диапазоне температур 30-80 °С, нагрузочную способность и теплостойкость граничного слоя в зоне фрикционного контакта при удельных нагрузках 1-10 МПа и скоростью скольжения 0,1-1 м/с.

Разработаны составы и технология получения дисперсных композиционных материалов на основе термопластичных матриц (ПА 6, ПТФЭ) путем совместной механоактивации компонентов в диапазоне ускорений 20-60 g с последующим диспергированием продуктов механохимического взаимодействия при криогенных температурах (-150 ÷ -198 °С) и формированием изделий или покрытий по технологии псевдооживленного слоя или прессования. Дисперсные продукты механохимических взаимодействий формируют композиты с параметрами деформационно-прочностных и трибохимических характеристик, в 1,1-1,3 раза превосходящих параметры аналогов.

#### Список использованных источников

1. **Струк, В.А.** Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк. – Минск, 1988. – 323 л.
2. **Гольдаде, В.А.** Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
3. **Рыскулов, А.А.** Разработка машиностроительных материалов на основе смесей металлополимеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / А.А. Рыскулов. – Гомель, 1990. – 201 л.
4. **Напреев, Р.С.** Закономерности коррозионно-механического изнашивания трибосистем и разработка смазочно-охлаждающих технологических сред, повышающих их долговечность: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Р.С. Напреев. – Гомель, 1990. – 146 л.
5. **Охлопкова, А.А.** Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе полимеров и ультрадисперсных керамик: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / А.А. Охлопкова. – Якутск, 2000. – 269 л.
6. **Охлопкова, А.А.** Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1996. – 162 с.
7. **Виноградов, А.В.** Создание и исследование машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / А.В. Виноградов. – Гомель, 1993. – 293 л.

8. **Петрова, П.Н.** Разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и природных цеолитов Якутских месторождений: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / П.Н. Петрова. – Якутск, 2002. – 140 л.
9. **Липатов, Ю.С.** Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – М.: Химия, 1991. – 260 с.
10. Физико-химия многокомпонентных полимерных систем: в 2 т. / Под общ. ред. Ю.С. Липатова. – Киев: Наукова думка, 1986. – Т. 1: Наполненные полимеры. – 1986. – 376 с.
11. Металлополимерные нанокompозиты: особенности структуры, технология, применение / А.А. Рыскулов [и др.]; под науч. ред. В.А. Струка, В.А. Лиопо. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 335 с.
12. Нанокompозиционные и наноструктурные машиностроительные материалы и технологии их получения / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 224 с.
13. **Витязь, П.А.** Перспективные нанокompозиты на основе ультрадисперсных алмазов / П.А. Витязь // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр., Полоцк, 2001 г. / Полоц. Гос. ун-т; под ред. С.А. Астапчика, П.А. Витязя. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 4-8.
14. Низкоразмерные системы: Физические основы получения, диагностики, функционирования и применения низкоразмерных элементов и систем: сб. науч. тр. / Бел. гос. ун-т; под ред.: В.Ф. Стельмаха, А.К. Федотова. – Минск: БГУ, 2000. – 98 с.
15. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
16. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов. Ч. 1: Модельные представления / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2008. – 328 с.
17. Трибохимические технологии функциональных композиционных материалов. Ч. 2: Технология и опыт применения / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, Ф.Г. Ловшенко. – Гродно: ГГАУ, 2008. – 399 с.
18. Механохимический синтез дисперсных слоистых композитов на основе каолинита и высших карбоновых кислот / Т.Ф. Григорьева [и др.] // Доклады Российской академии наук. – 1995. – Т. 341, № 1. – С. 66-68.

**Eisymont Ye.I., Grigorjeva T.F., Burtsev A.N., Auchynnikaу Ya.V., Audzeichyk S.V.**

### **Energy aspects of the technology of composite thermoplastic materials for metal-polymer constructions**

*The article considers the influence of the energy factor, due to the effects of technological impact on the components and on the formation of materials based on thermoplastics. It was shown the efficiency of mechanochemical combining of polymer and dispersed fillers in obtaining the composites with improved parameters of deformation strength and tribological characteristics.*

Поступила в редакцию 22.04.2015 г.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Президиума Государственной ВАК РФ от 24.12.1997 г. № 178 (в редакции с изменениями и дополнениями, Постановление ВАК РФ от 22.02.2006 г. № 2 и Постановление ВАК РФ от 15.08.2007 г. № 4).

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.
2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна.
3. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Microsoft Word (97-2010). Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
4. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии авторов, наименования организаций, в которых работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация и название статьи, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
5. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), графики присоединены с помощью табличного процессора «Excel» или «MS Graph» (встроенного в «Word»). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы.
6. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type».
7. Обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Размерность всех величин, приведенных в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых. Для обозначения физических величин используется курсивный шрифт, для математических символов типа  $\cos$ ,  $\max$ , критериев вида  $Nu$ ,  $Re$  и т.п., чисел, химических символов – прямой шрифт. Для русских и латинских букв в индексах используется прямой шрифт, если они не относятся к обозначениям физических величин, а являются сокращением слова, курсив – если принимают последовательные значения или служат для перечисления чего-либо, обозначения ряда чисел и т.п.
9. Список использованных источников должен быть приведен в конце статьи и содержать полные библиографические данные. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.
10. Авторам необходимо на отдельной странице предоставить о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, почтовый адрес для переписки, место работы и занимаемая должность, а также номера телефонов, факсимильной и электронной связи.

1. The feature material should correspond to the magazine's profile and should be expounded very understandable.
2. The articles provided to the magazine editorial staff are reviewed. The main criteria of publishing feasibility are subjects' urgency and scientific novelty.
3. The article should be presented in printed out and electronic form in the Microsoft Word format (97-2010). The body text is Times New Roman, size 12, interval – 1.
4. The UDC number, article's title, authors' surnames, names of organizations where the authors work should be stated in the article. The article should contain annotation (till 10 lines), introduction, the basic part, the conclusion finished by accurately formulated consequences, and as well as the list of the used sources. The annotation, the article's title and as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
5. The pictures should be well-defined and should be created in one of the graphic editors (format jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd); in this case they are attached with tabular based processor Excel or MS Graph (built-in Word). All symbols in the figures should be deciphered.
6. The tables are placed directly in the text of the article. Each table should have the title. All tables and diagrams should have references in the text. Formulae should be done by «Math Type» editing program.
7. Symbols used in the article are deciphered directly in the text; in addition they could be taken out on a separate page.
8. Dimension of all sizes accepted in the article should correspond to the International System of Units (SI). The abbreviations except for the standards should not be used. Designations of physical quantities are given by Italic characters. Mathematical symbols such as  $\cos$ ,  $\max$ , criteria of kind  $Nu$ ,  $Re$ , etc., numbers, chemical symbols are given by Roman characters. Russian and Latin letters in indexes are given by Roman characters if they do not refer to designations of physical quantities and are word abbreviations, they are given by Italics if they accept successive values or serve for enumeration of something, sequence designation, etc.
9. The list of the used sources should be given at the end of the article and contain full bibliographic data. The list should be made in the order as the references are mentioned in the text. The references to the unpublished works are not allowed.
10. The authors should provide the following information on a separate page: surname, given name, patronymic name, and postal address for correspondence, place of employment and work status; as well as phone numbers, fax number, and e-mail address.

**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 горношахтного 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 горношахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

**Адрес редакции:**

Республика Беларусь,  
223710, г. Солигорск, ул. Козлова, 69

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

**Телефоны:**

(+375 174) 26 28 37      главный редактор (приемная)

(+375 174) 26 35 32      ответственный секретарь

E-mail: [ontipr@tut.by](mailto:ontipr@tut.by)

<http://www.sipr.by>