

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2018 № 1

20  
лет  
журналу

# ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

## № 1 2018

### Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем  
ресурсосбережения с Опытным  
производством»

### Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

### Редакция:

Главный редактор  
**Прушак Виктор Яковлевич**

Ответственный секретарь  
**Заяц Ирина Михайловна**

Заместитель главного редактора  
**Петровский Борис Иванович**

### Редакционная коллегия:

С.С. Андрейко (Россия), П.Н. Богданович (Беларусь),  
Ц. Вутов (Болгария), В.А. Губанов (Беларусь), В.П. Зубов (Россия),  
Н.П. Крутько (Беларусь), Ф.И. Пантелейенко (Беларусь), В.А. Струк (Беларусь),  
В.М. Шаповалов (Беларусь), А.О. Шимановский (Беларусь)



### Адрес редакции:

ул. Козлова, 69, 223710, г. Солигорск, Минская обл., Республика Беларусь  
Тел.: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

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

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

|  |    |
|--|----|
| Кафанова Т.П., Ущаповский И.Ф., Прохоров Н.Н., Ефимов А.М. Изучение строения локальных малоамплитудных разломов сейсмическими методами из горных выработок ..... | 5  |
| Басалай И.А. Изучение возможности использования бурового раствора на основе сапропеля в тоннелепроходческом механизированном комплексе .....                     | 12 |

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Павлечко В.Н. Скорости и давления в центростремительной турбине при начальной закрутке наружного потока среды .....  | 19 |
| Сотник Л.Л., Сиваченко Л.А. Исследование влияния отдельных факторов на степень измельченности в вибровалковом измельчителе методом математического планирования эксперимента ..... | 30 |
| Довгяло В.А., Пупачев Д.С. Анализ возможностей применения быстросъемных соединительных устройств в конструкциях отечественных экскаваторов .....                                   | 37 |
| Локтионов А.В. Расчет уравнения малых колебаний с учетом сил тяжести и заданной начальной угловой скорости движения маятника .....   | 43 |

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Шаповалов В.М., Злотников И.И. Повышение эксплуатационных свойств полиамида 6 модифицированием металлофенолосиликатом .....                                       | 49 |
| Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Антонов А.С., Кравченко В.И. Структурно-технологические аспекты технологии фторкомпозитов .....                                      | 55 |
| Овчинников Е.В. Особенности формирования фторсодержащих покрытий на твердых субстратах .....  | 68 |
| Попова М.А., Попов А.Н., Казаченко В.П. Опытно-промышленные испытания модифицированных углеродными покрытиями уплотнительных колец .....                          | 81 |
| Приходько И.В. Исследование оптимального состава и закономерностей перераспределения пластификатора в объеме материала на основе модели структуры композита ..... | 86 |

На обложке: мобильная буровая установка

МБУ «Медведь».

На 1-й и 3-й страницах: отвалообразователь  
стреловой шагающий ОСШ-150/1600.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

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

---

Подписано в печать 19.03.2018 г.

Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м<sup>2</sup>. Заказ 1149. Усл. печ. л. 11,09. Тираж 120 экз.  
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография».

Ул. М. Богдановича, 7, 223610, г. Слуцк, Минская область, Республика Беларусь.

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

# MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

## № 1 2018

**Founder of the Journal:**  
JSC “Soligorsk Institute of Resources  
Saving Problems with Pilot Production”

**Scientific and Technical Journal**  
Published since December, 1998  
Issued four times a year

**Edition:**  
Editor-in-Chief  
**Prushak Viktor Yakovlevich**  
Executive Secretary  
**Zayats Irina Mikhailovna**

Editor-in-Chief Deputy  
**Petrovsky Boris Ivanovich**

### Editorial Board:

S.S. Andreiko (Russia), P.N. Bogdanovich (Belarus),  
Tz. Voutov (Bulgaria), V.A. Gubanov (Belarus), V.P. Zubov (Russia),  
N.P. Krutko (Belarus), F.I. Panteleenko (Belarus), V.A. Struk (Belarus),  
V.M. Shapovalov (Belarus), A.O. Shimanovsky (Belarus)



**Editorial Address:**  
Kozlova street 69, 223710, Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus  
Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)

The journal is included in the list of scientific publications of the Republic of Belarus for publishing the results of dissertation studies on scientific directions: technical sciences (geotechnology, materials engineering, machine-building)

The magazine is included in Russian Science Citation Index

© JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, 2018

## CONTENTS

---

---

### ***GEOTECHNOLOGY***

|   |    |
|---|----|
| <b>Kafanova T.P., Ushchapousky I.F., Prohorov N.N., Efimov A.M.</b> Research of the structure of local low-amplitude faults with seismic methods from mine workings ..... | 5  |
| <b>Basalai I.A.</b> Studying the possibility of using sapropel based drilling mud fluid in the tunnel-boring mechanized complex .....                                     | 12 |

### ***MACHINE-BUILDING***

|   |    |
|---|----|
| <b>Pavlechko V.N.</b> Velocities and pressures in an inward-flow turbine with initial swirling of the outer fluid flow .....  | 19 |
| <b>Sotnik L.L., Sivachenko L.A.</b> The analysis of the influence of definite factors on degree of grinding in the vibrating-rolling grinder by the method of mathematical planning of the experiment ..... | 30 |
| <b>Dovgyalo V.A., Pupachou D.S.</b> Analysis of quick-detachable coupling devices application possibilities in constructions of domestic excavators .....   | 37 |
| <b>Loktionov A.V.</b> Calculation of the equation of small oscillations with allowance for the gravity forces and a given initial angular velocity of the pendulum motion .....                             | 43 |

### ***MATERIALS ENGINEERING***

|   |    |
|---|----|
| <b>Shapovalov V.M., Zlotnikov I.I.</b> Increase of operational properties of polyamide 6 modification metallophthalocyanines .....  | 49 |
| <b>Avdeychik S.V., Sarokin V.G., Antonov A.S., Krauchanka V.I.</b> Structural and technological aspects of fluorine composition materials technology .....                                | 55 |
| <b>Auchynnikau Y.V.</b> Peculiarities of formation of fluorinating coatings on solid substrates ...   | 68 |
| <b>Popova M.A., Popov A.N., Kazachenko V.P.</b> Experiment-industrial tests of sealing rings modified by carbon coatings .....  | 81 |
| <b>Prihodzko I.V.</b> The study of the optimal composition and regularities of the redistribution of plasticizer in the bulk material based on the model of the composite structure ..... | 86 |

---

---

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ**

УДК 622.016:550.834.08(045)(476)

**ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ РАЗЛОМОВ  
СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ИЗ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

Кафанова Т.П., Ушаповский И.Ф., Прохоров Н.Н., Ефимов А.М. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

*В статье приведены результаты геофизических исследований методами сейсморазведки на участке шахтного поля рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Рассмотрено формирование полей отраженных волн в тонкослоистой среде Старобинского месторождения калийных солей в зоне малоамплитудного разлома. Предложен сейсмический метод изучения соленосной толщи, как способ определения границ разломной зоны.*

**Ключевые слова:** калийные рудники, водозащитная толща, глинистомергелистая толща, шахтные геофизические исследования, метод отраженных волн, метод общей глубинной точки, сейсморазведка, интерпретация данных геофизики.

**Введение**

Одной из актуальных задач при разработке Старобинского месторождения калийных солей является защита рудников ОАО «Беларуськалий» от затопления. При разработке соляных рудников одним из условий безопасного ведения горных работ является способность водозащитной толщи (ВЗТ) препятствовать проникновению рассолов в горные выработки после отработки продуктивных горизонтов. Глинистомергелистая толща (ГМТ), покрывающая соленосные отложения, может быть одним из источников поступления рассолов в горные выработки. Соленосная толща на Старобинском месторождении калийных солей – главная составляющая ВЗТ, поэтому основное внимание направлено на изучение ее мощности и состояния. Разрывные тектонические разломы могут служить путями проникновения рассолов в горные выработки в случае их достижения пород ГМТ. Поэтому одними из главных задач являются изучение их строения, конфигурации, протяженности и пространственного положения в соленосной толще. Наиболее перспективным направлением для решения этой актуальной задачи является применение дистанционных геофизических методов исследований, в частности, применение методов шахтной сейсморазведки, что позволит повысить безопасность ведения горных работ при разработке месторождения [1].

С этой целью в выработках 20-й южной «А» панели рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» в районе малоамплитудного разлома были проведены шахтные геофизические исследования.

**Результаты исследований**

Шахтные геофизические исследования сейсмическими методами отраженных волн (МОВ) и общей глубинной точки (МОГТ) были проведены в вентиляционном штреке лавы 20а-1 20-й южной «А» панели Третьего калийного горизонта рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий».

На исследуемом участке при проходке выработок верхней лавы 20а-1 (вентиляционного, конвейерного, разгружающего штреков) 20-й южной «А» панели Третьего горизонта были вскрыты геологические признаки разломной зоны малоамплитудного разлома (рисунок 1).



Для выделения слабых сейсмических сигналов применялось накопление путем суммирования до 3 воздействий (ударов) на пункте возбуждения. Интервал расположения пунктов возбуждения колебаний – 6 м. Направление действия ударной силы осуществлялось в почву и кровлю горной выработки.

В качестве приемников использовались приборы СВ-1-20П. Расстояние между сейсмоприемниками – 2 м. На начальных пикетах профилей сейсмоприемники устанавливались в специально пробуренные шпурки в кровлю 3-го сильвинитового слоя Третьего калийного горизонта нормально стенке выработки. Высота расположения приборов составляла от 1,2 до 1,5 м от подошвы выработки. По результатам сейсмических исследований верхнего и нижнего полупространств соленосной толщи построены сейсмические разрезы МОГТ (рисунок 2) и МОВ (рисунок 3) участка наблюдений.

При изучении формирования поля упругих колебаний верхнего и нижнего полупространств соленосной толщи были использованы геологические материалы по скважине № 179.

Согласно разрезу скважины № 179 отложения, залегающие выше и ниже Третьего калийного горизонта, представляют ритмичное чередование слоев каменной соли и глин. Границы контакта слоев различного литологического состава мощностями  $d \geq \lambda$  (где  $\lambda$  – длина волн) являются опорными отражающими границами образования волн. Согласно литологическому разрезу определена сейсмогеологическая привязка выделяемых групп отраженных волн. На переходах глина-соль и наоборот возникают отраженные волны, которые фиксируются на сейсмограммах [2].

По результатам сейсмических исследований нижнего полупространства соленосной толщи выделены следующие отражающие границы (рисунок 3).

Отражающая граница  $t_1$ , расположенная на удалении 32 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, приурочена, очевидно, к контакту пород, отличающихся по своим прочностным и скоростным характеристикам внутри 12-й литологической пачки.

Отражающая граница  $t_2$ , удаленная от линии установки сейсмоприемников на 38 м (ПК 520), контролирует поведение песчаников 12-й глинисто-карбонатной пачки.

Отражающие границы  $t_3$ , и  $t_4$ , удаленные от линии установки сейсмоприемников соответственно на 61 м и 70 м (ПК 520), приурочены к прослойям тонкослоистой глины внутри 11-й соляной пачки.

Отраженная волна  $t_5$ , расположенная на удалении 81 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, образуется на границе контакта 11-й и 10-й литологических пачек.

По результатам сейсмических исследований верхнего полупространства соленосной толщи выделены следующие отражающие границы (рисунок 3).

Отраженная волна  $t_1'$ , расположенная в 28 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, приурочена к кровле верхнего сильвинитового пласта Третьего калийного горизонта.

Отраженная волна  $t_2'$ , расположенная в 34 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, контролирует 14-ю глинистую пачку.

Отраженная волна  $t_3'$ , расположенная в 45 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, приурочена к прослойям глины внутри 15-й соляной пачки.

Отраженная волна  $t_4'$ , расположенная в 67 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, относится к подошве 18-й глинистой пачки.

Отраженные волны  $t_5'$  и  $t_6'$ , расположенные в 77 м и 99 м (ПК 520) от линии установки сейсмоприемников, приурочены к kontaktам пород, отличающимся по своим прочностным и скоростным характеристикам внутри 19-й и 20-й литологических пачек.

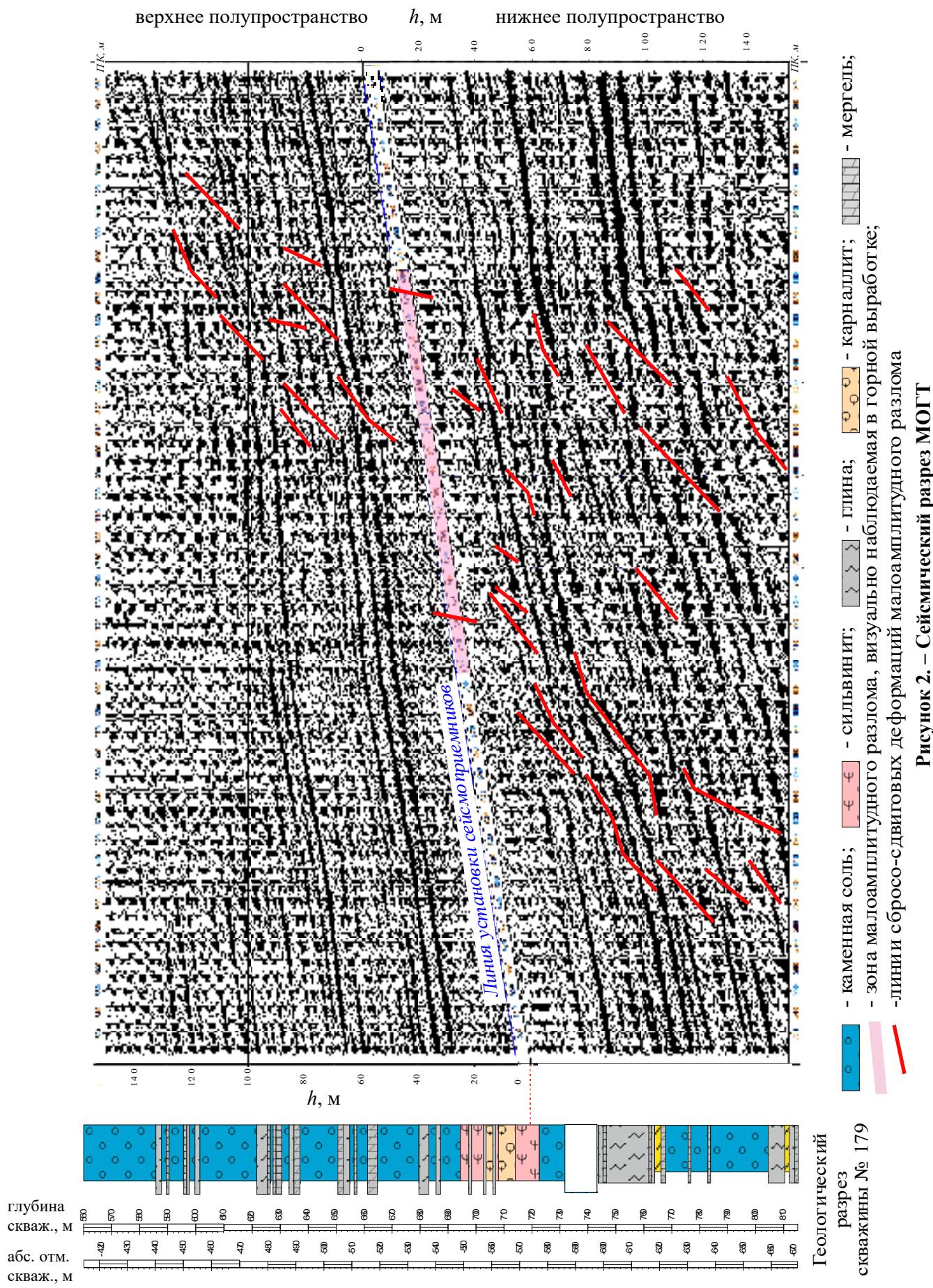
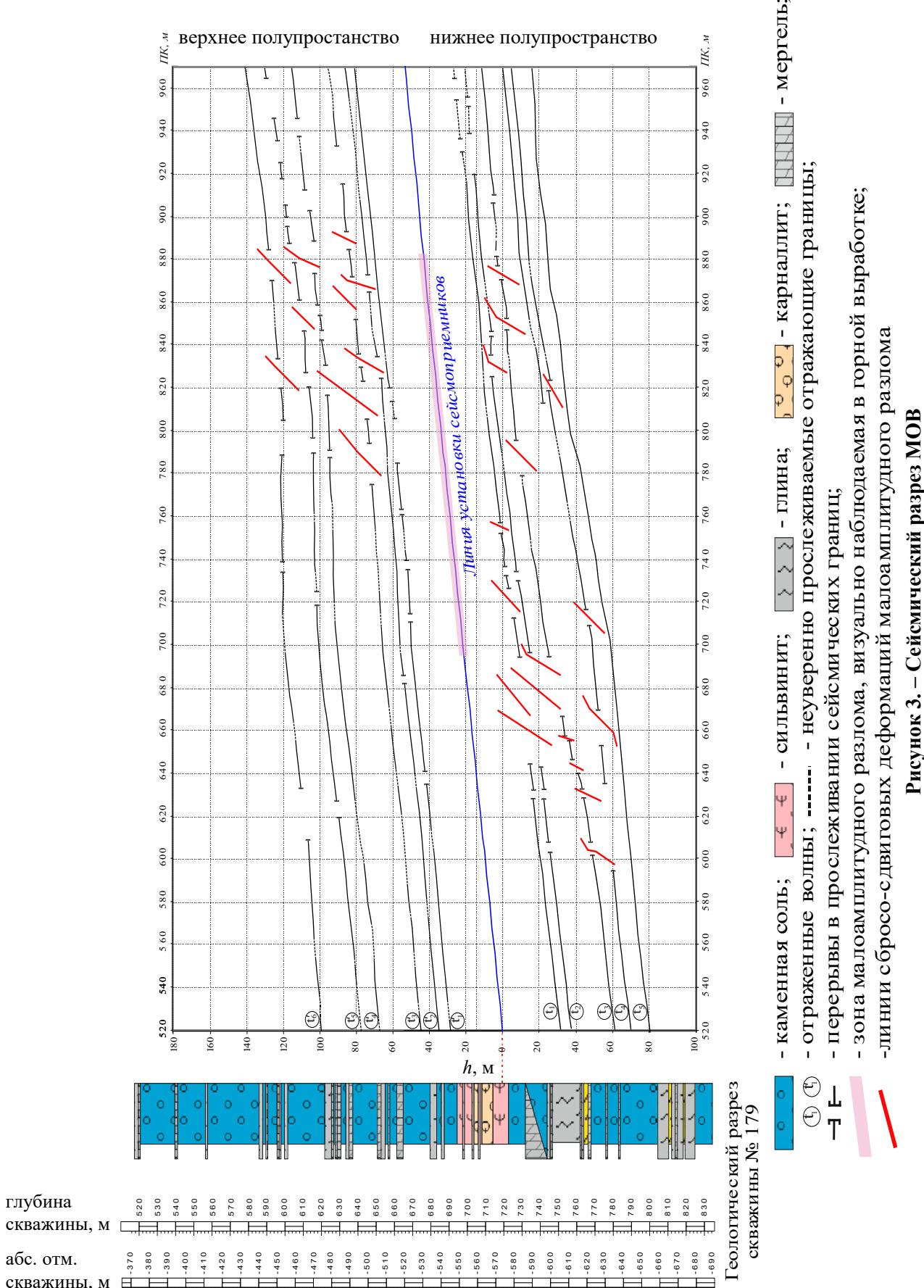


Рисунок 2. – Сейсмический разрез МОГТ



По результатам сейсмических работ методами отраженных волн и общей глубинной точки, проведенных в вентиляционном штреке лавы 20а-1 20-й южной «А» панели Третьего калийного горизонта рудника 4 РУ (рисунки 2, 3) на ПКПК 520-580 профиля наблюдений, все группы отраженных волн ведут себя устойчиво и достаточно выдержаны по глубинам залегания.

Признаки зоны малоамплитудного разлома визуально наблюдаются непосредственно в горной выработке на ПКПК 720-880. По мере приближения к ней меняется геометрия залегания слоев, что выражается углами наклона и сложными криволинейными формами.

Зона влияния малоамплитудного разлома в нижнем полупространстве соленосной толщи выделена на ПКПК 580-880 сейсмического профиля по вентиляционному штреку лавы 20а-1 (рисунки 2, 3). Данный участок характеризуется неоднородностью и сложным строением. В поле отраженных волн этот участок профиля выделяется смещением осей синфазности, затуханием сейсмического сигнала в области повышенной трещиноватости, сопутствующей разлому, изменением амплитудно-частотных характеристик, наличием наклонных отражающих элементов, выделением линий смещений (бросов, взбросов). Наблюдается прекращение корреляции и осложнения в прослеживании всех групп отраженных волн. Массив соленосных пород на данном участке профилей будет иметь повышенную трещиноватость и будет ослаблен по своим прочностным свойствам, особенно на участках сбросо-сдвиговых деформаций.

В верхнем полупространстве соленосной толщи на ПКПК 720-940 все отражающие границы также претерпевают перерывы прослеживания и сбросо-сдвиговые деформации.

Основные линии сбросо-сдвиговых деформаций малоамплитудного разлома на рисунках 2, 3 выделены красным цветом.

Характер распространения основных линий сбросов (взбросов) и высокая плотность их распределения особенно ярко выражены на сейсмических разрезах нижнего полупространства соленосной толщи. Амплитуды смещения отражающих границ в нижнем полупространстве соленосной толщи достигают 10 м. Отсутствие таких амплитуд на разрезе верхнего полупространства указывает на постепенное затухание малоамплитудного разлома вверх по разрезу, не достигая глинисто-мергелистой толщи.

Таким образом, результаты сейсмических исследований методами отраженных волн и общей глубинной точки указывают на приуроченность зоны малоамплитудного разлома к кристаллическому фундаменту и постепенному ее затуханию вверх по разрезу соленосной толщи, не достигая глинисто-мергелистой толщи. В соответствии с «Правилами защиты рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения калийных солей» разломы такого типа не представляют опасности по проникновению агрессивных вод из вышележащих водоносных горизонтов в подземное пространство и не требуют оставления вдоль них предохранительных приразломных целиков.

## Выводы

По результатам шахтных геофизических исследований сейсмическими методами отраженных волн и общей глубинной точки, проведенных в выработках 20 южной «А» панели рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», изучено формирование волнового поля упругих колебаний в соленосной толще в районе малоамплитудного разлома, определены критерии выявления разломов на сейсмограммах МОВ и сейсмических разрезах МОГТ (смещение осей синфазности, затухание сейсмического сигнала в области повышенной трещиноватости сопутствующей разлому, изменение амплитудно-частотных

характеристик, наличие наклонных отражающих элементов, выделение линий смещений (бросов, взбросов на разрезах ОГТ) и т.д.). Это позволяет применять шахтные сейсмические методы для изучения строения, конфигурации, протяженности и пространственного положения малоамплитудного разлома в соленосной толще.

В случае достижения разломами пород нижней части глинисто-мергелистой толщи, либо их связи с участками скопления рассолов в соленосной толще применение методов подземной сейсморазведки позволяет решать задачи определения опасности проникновения рассолов в горные выработки.

Наличие обводненности пород нижней части ГМТ, либо пород соленосной толщи возможно определять методами подземной электроразведки, поэтому для объективного прогноза опасности проникновения рассолов в горные выработки необходимо комплексировать подземные сейсмические и электрометрические методы.

На основании полученных результатов применения методов подземной геофизики выдаются рекомендации для безопасного ведения горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» Старобинского месторождения калийных солей.

#### **Список использованных источников**

1. Применение геофизических методов в горных выработках Старобинского месторождения калийных солей при поисках и картировании малоамплитудных нарушений разрывного типа / В.Б. Вагин [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. – 2004. – № 1. – С. 47-49.
2. Вагин, В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород / В.Б. Вагин. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 188 с.

---

**Kafanova T.P., Ushchaposky I.F., Prohorov N.N., Efimov A.M.**

**Research of the structure of local low-amplitude faults with seismic methods from mine workings**

*The article presents the results of geophysical surveys using seismic survey methods at the mine site of the mine 4 RU of JSC Belaruskali. The formation of fields of reflected waves in the thin-layered medium of the Starobinsky deposit of potassium salts in the low-amplitude fault zone is considered. A seismic method for researching the salt-bearing strata is proposed as a method for determining the boundaries of a fault zone.*

*Keywords: potash mines, waterproof stratum, argillaceous-marly column, mine geophysical researches, reflection wave method, common depth point method, seismic survey, interpretation of geophysical data.*

Поступила в редакцию 28.02.2018 г.

УДК 622.2+631.8+656.3

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БУРОВОГО РАСТВОРА НА ОСНОВЕ САПРОПЕЛЯ В ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОМ МЕХАНИЗИРОВАННОМ КОМПЛЕКСЕ

Басалай И.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*В работе проведен анализ основных способов сооружения подземных коммуникаций проходческими механизированными комплексами. Изучены режимы работы исполнительных органов технологических машин при взаимодействии с горной породой с учетом влияния бурового раствора на их эксплуатационные свойства. Проведен анализ основных буровых растворов. Изучены состав и свойства сапропеля и показана возможность его использования в качестве основного компонента бурового раствора в тоннелепроходческом комплексе.*

Ключевые слова: *проходческий комплекс, тоннель, буровой раствор, сапропель.*

### Введение

Проходка тоннелей для подземных коммуникаций различного назначения, а также линий метрополитена сопровождается выполнением большого объема работ по разработке грунтов различных категорий и экскавации их за пределы технологических площадок.

При проходке тоннелей подземных коммуникаций механизированными комплексами используется большой объем бурового раствора. Он способствует повышению пластичности экскавируемого грунта, снижению удельных затрат энергии на фрезерование массива по площади забоя, а также снижает износ породоразрушающего инструмента, основных элементов металлоконструкции исполнительного органа и винтового конвейера. В настоящее время наиболее распространенными являются два вида буровых растворов – на основе бентонита и пенного реагента. Энергоемкость и эффективность процесса, в значительной степени, определяются конструктивными особенностями проходческих машин и оборудования, режимами работы исполнительных органов по фрезерованию массива и экскавации грунта из забоя на дневную поверхность, а также типом бурового раствора [1].

В настоящее время сооружение подземных коммуникаций и линий метрополитена проводится, в основном, четырьмя способами:

- продавливание технологического снаряда в грунте, без применения бурового раствора;
- горизонтально направленное бурение с применением бурового раствора для транспортирования выбуренной породы на дневную поверхность;
- микротоннелирование с гидротранспортом шлама в виде пульпы из забоя на дневную поверхность с последующей сепарацией смеси. При проходке используется специальный бентонитовый раствор и различные полимеры;
- использование тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) с грунтопригрузом для строительства тоннелей большого диаметра (6 м и более) [2]. Для проходки на таких комплексах также используется полимер и бентонит для снижения сил трения и налипания породы к режущему инструменту в глинистых грунтах.

Одним из самых распространенных в мире способов бурения является строительство глубоких скважин для разработки месторождений нефти и природного газа. Для этого применяются различные по конструкции и принципу действия буровые установки для формирования ствола скважины и последующего его крепления. В нашей республике также освоен выпуск колтюбинговых установок для комплексного обслуживания и бурения нефтяных и газовых скважин. В этих установках в зависимости от горно-геологических условий и режимов бурения в основном применяются буровые растворы на основе глины.

### **Цель и задачи исследования**

Применение буровых растворов на основе бентонита и пенного реагента в тоннелепроходческом комплексе является экономически затратным и экологически небезопасным, ввиду необходимости утилизации экскавируемой породы, из-за негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим, актуальным является разработка альтернативных видов экологически безопасных буровых растворов.

Цель работы – изучение возможности и эффективности применения буровых растворов на основе сапропеля вместо буровой пены при проходке подземных коммуникаций механизированными комплексами.

В работе решены следующие задачи.

- Изучить перспективные способы проходки тоннелей подземных коммуникаций в городских условиях и проблему рационального использования земных недр Республики Беларусь.
- Провести анализ буровых растворов, режимов работы исполнительных органов технологических машин при взаимодействии с горной породой с учетом влияния бурового раствора на их эксплуатационные свойства.
- Исследовать возможность использования сапропеля в качестве основного компонента бурового раствора в тоннелепроходческом комплексе.

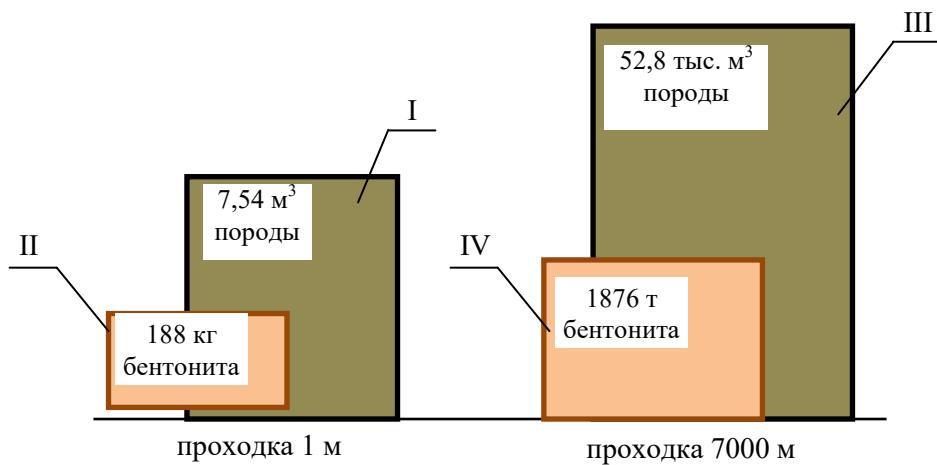
### **Основная часть**

Технико-экономическая эффективность проходки скважин и тоннелей подземных коммуникаций зависит от режима промывки и технологических свойств буровых растворов. Стоимость буровых и тампонажных растворов в ряде случаев достигает трети общих затрат на процесс проходки. Поэтому понятна необходимость в определении оптимальных режимов промывки и подборе высокоэффективных и дешевых по стоимости буровых растворов.

Следует отметить, что при проходке тоннелей подземных коммуникаций с большим поперечным сечением канала подлежат экскавации из забоя на дневную поверхность большие объемы породы, а соответственно – и значительные по объему расходы бурового раствора. Результаты расчетов этих двух показателей на примере строительства в городе Минске двух крупных объектов – коллектора ливневой канализации «Центр» и транспортных тоннелей Третьей линии Минского метрополитена – представлены, соответственно, на рисунках 1 и 2.

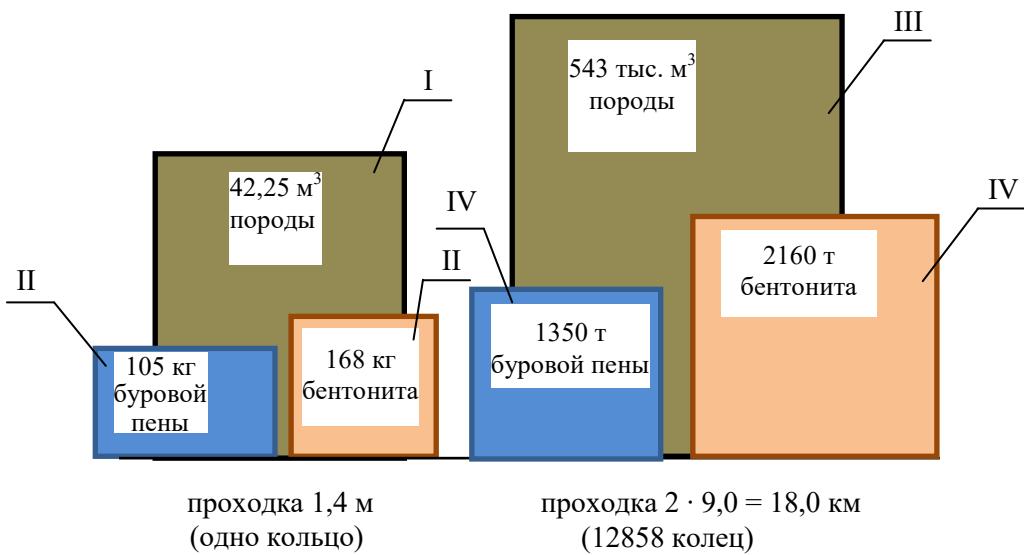
На рисунке 1 представлены эксплуатационные параметры микротоннелепроходческого комплекса.

При микротоннелировании после прохождения пульпы через сепарационную установку и отделения породы, раствор используется повторно для транспортирования грунта, а очищенный грунт складируется на технологической площадке [3].



I – объем грунта при диаметре кольца 3 м на длине проходки 1 м; II – расход бурового раствора на 1 м; III – объем грунта при полной реализации проекта (длина 7000 м); IV – планируемая потребность бурового раствора по проекту

Рисунок 1. – Диаграммы эксплуатационных параметров микротоннелепроходческого комплекса при прокладке коллектора «Центр»



I – объем грунта при диаметре кольца 6 м на длине проходки 1,4 м; II – расход бурового раствора на 1,4 м проходки; III – объем грунта при полной реализации проекта с учетом прокладки двух параллельных тоннелей, протяженностью каждого около 9 км; IV – планируемая потребность бурового раствора по проекту

Рисунок 2. – Диаграммы эксплуатационных параметров ТПМК с грунтопригрузом при проходке тоннеля Третьей линии Минского метрополитена

При этом способе проходки с использованием ТПМК порода, обработанная пенным полимерным раствором, не проходит очистку и сепарацию, поэтому в каждом кубометре экскавируемой породы содержится около 2,5 кг пенного реагента.

Экскавируемая проходческими комплексами порода, как и в третьем способе, не пригодна для дальнейшего использования, поэтому она утилизируется на специально отведенных технологических площадках, расположенных на значительном расстоянии

от городских коммуникаций. Для этих целей, как правило, используются отработанные песчано-гравийные карьеры, которые оборудуются гидроизолирующей пленкой, исключающей попадание остатков бентонита или пенного продукта в грунтовые воды (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Утилизация экскавируемого грунта от ТПМК  
в отработанный песчано-гравийный карьер**

Например, расход дизельного топлива одним автосамосвалом грузоподъемностью 25 т на транспортирование грунта за пределы города на расстояние до 20 км составляет 12 литров. Для перевозки грунта объемом 3 тыс. м<sup>3</sup> (при плотности 1,4 т/м<sup>3</sup> объем составит 4,2 тыс. т), экскавируемого ТПМК на длине проходки 100 м, расход топлива составляет 1,8 т (168 рейсов).

Таким образом, растворы должны обладать строго нормируемыми технологическими и структурно-реологическими свойствами. При этом, они не вызывают осложнений при бурении, а также загрязнений недр.

Общие требования к качеству буровых растворов:

- низкая плотность и минимальное содержание твердой фазы;
- малые значения вязкости;
- нейтральность по отношению к разбуриаемым породам и безвредность к окружающей среде и обслуживающему персоналу буровой.

В настоящее время наиболее распространенными являются два вида буровых растворов – на основе бентонита и пенного реагента. В зависимости от концентрации пенного реагента в воде буровой раствор может использоваться в виде густой пены, пены и тумана.

Независимо от концентрации пенные растворы должны обладать следующими свойствами: пенообразующей способностью, кратностью, стабильностью (устойчивостью), дисперсностью. Пена, как и любая дисперсная система, является агрегатно неустойчивой, что объясняется избытком поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела «жидкость - газ».

На исследуемом объекте, т.е. на тоннелепроходческом комплексе, используются импортные дорогостоящие буровые растворы на основе бентонита и, особенно в боль-

---

шом количестве, буровой пены, применение которых разрешено экологическими сертификатами. Для приготовления пены используется специальная установка, находящаяся непосредственно на проходческом щите. Раствор приготавливается с концентрацией пены в воде до 3 %.

Анализ показывает, что применение вышеуказанных буровых растворов на тоннелепроходческом комплексе является экономически затратным и экологически не безопасным, ввиду необходимости утилизации экскавируемой породы, из-за негативного воздействия на окружающую среду. В связи с этим, актуальным является разработка альтернативных видов экологически безопасных буровых растворов.

В работе предлагается использовать в тоннелепроходческом комплексе буровой раствор на основе сапропеля. Это предложение основано на анализе результатов научных исследований, проведенных в этой области. Работами ученых Беларуси и России показано, что в качестве широко распространенного сырья для приготовления буровых растворов могут быть использованы сапропели и торф малой зольности [4].

В их составе имеются все компоненты, необходимые для приготовления буровых растворов, такие как тонкодисперсная минеральная составляющая, гуминовые вещества, битумы, легко- и трудногидролизуемые вещества, лигнин и другие.

Основное достоинство торфяных и сапропелевых буровых растворов – их экологичность, простота приготовления и обработки.

Сапропели, как и торф, а также угли и горючие сланцы – это органическое вещество биогенного происхождения, т.е. каустобиолиты. Формирование сапропелевых отложений пресноводных водоемов определяется особенностями накопления в них органических и минеральных веществ и процессами деструкции. Концентрация биологических и химических компонентов в сапропелевых отложениях различных озер связана со спецификой гидробиологических, гидрохимических и гидродинамических факторов озерного оседания.

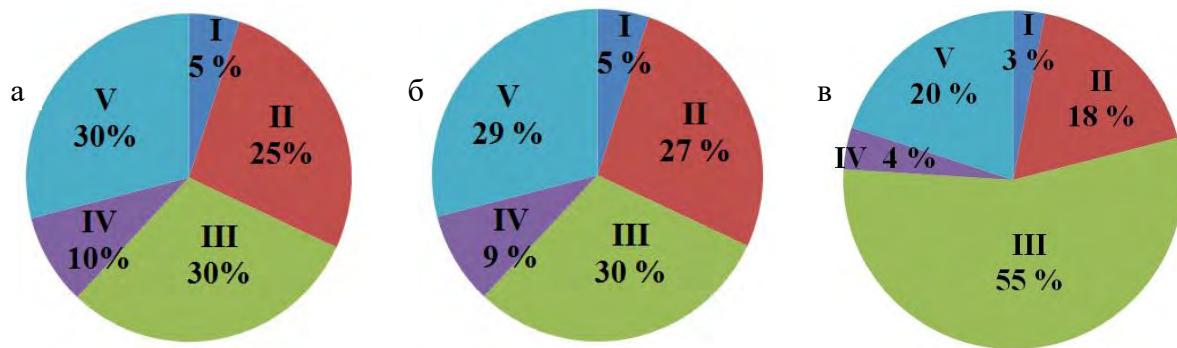
Согласно генетической классификации, озерные отложения подразделяются на четыре типа с определенным содержанием органического вещества. Общие запасы сапропелевых отложений в Беларуси оценивают в 3,6 млрд м<sup>3</sup>.

Институтом природопользования НАН Беларуси разработана промышленно-генетическая классификация сапропелевых отложений, залегающих в озерах на территории республики [5]. Все их многообразие разделено на четыре типа: органические, кремнеземистые, карбонатные и смешанные. Химический состав трех типов сапропеля приведен на диаграммах (рисунок 4).

В настоящее время добыча сапропеля ведется на трех крупных озерах (Добеевское, Витебская обл.; Червоное, Гомельская обл.; Вечер, Минская обл.). Для экскавации сапропеля со дна озера используют экскаваторы и земснаряды. Экскавируемый сапропель транспортируется на технологические площадки для сушки. Годовые объемы производства продукции на основе сапропеля различного назначения составляют сотни тыс. тонн. Основные области применения продуктов на основе сапропеля: сельское хозяйство, медицина, а также одно из новых направлений – сорбенты для локализации радионуклидов в почвах, воде и зеленой массе.

В процессе добычи и переработки сапропеля из-за интенсивного механического воздействия его природная структура существенно изменяется. Одной из важнейших характеристик, определяющих структуру и свойства сапропеля, является дисперсность. Естественные дисперсии сапропелей (не подвергавшихся сушке) обладают высокой агрегативной устойчивостью, термо- и солестойкостью, имеют удовлетворительные структурно-реологические и энергетические характеристики. На эксплуатационные

свойства бурового раствора значительное влияние оказывает минералогический состав сапропеля.



**а – органические сапропели; б – кремнеземистые; в – карбонатные;**  
**I – битум; II – легкогидролизуемые вещества; III – гуминовые вещества;**  
**IV – трудногидролизуемые вещества; V – негидролизуемый остаток**

**Рисунок 4. – Общая характеристика исследованных отложений сапропелей**

На практике применение естественных дисперсий, несмотря на преимущества, имеет определенные недостатки: требуются особые условия для их транспортировки на большие расстояния и хранения в зимний период. Гораздо экономичнее перевозить порошкообразный воздушно-сухой сапропель и готовить дисперсии непосредственно при их использовании в бурении.

В России еще в 1992 году разработан буровой раствор для использования в установках для вертикального бурения глубоких скважин [6]. Он содержит в качестве твердой фазы сапропель в количестве 2-10 %. Его использование по сравнению с буровыми растворами на основе бентонитовых глин имеет определенные преимущества, в том числе, уменьшение загрязнения продуктивных пластов и окружающей среды.

В результате исследований установлено, что для приготовления бурового раствора применительно к проходческому комплексу вполне достаточно из экскавируемой сапропелевой массы удалить только часть свободносвязанной воды естественным обезвоживанием (в тонких слоях), доведя влажность продукта до 50-60 %. Предлагаемый способ можно эффективно реализовать при добыве сапропеля из небольших водоемов, расположенных на небольшом расстоянии от объектов прокладки подземных коммуникаций. Для реализации этого способа на факультете горного дела и инженерной экологии БНТУ совместно с Институтом природопользования НАН Беларуси разработан принципиально новый технологический процесс добычи сапропеля на мелкоконтурных водоемах с использованием канатного скрепера [7].

В настоящее время разработана методика и проведена серия лабораторных экспериментов, направленных на оптимизацию физико-механических свойств грунта, экскавируемого исполнительными органами ТПМК с использованием бурового раствора на основе сапропеля.

### Заключение

Представленные выше результаты исследований показывают возможность повышения эксплуатационных показателей тоннелепроходческих механизированных комплексов при обеспечении экологических мероприятий по инженерной защите окружающей среды.

Применение бурового раствора на основе сапропеля позволит решить актуальную проблему по импортозамещению дорогостоящего компонента – буровой пены в ТПМК с грунтопригрузом.

Для выработки практических рекомендаций по эффективному применению бурового раствора на основе сапропеля в ТПМК требуется проведение серии лабораторных исследований и промышленных испытаний.

### **Список использованных источников**

1. Валиев, А.Г. Современные щитовые машины с активным пригрузом забоя / А.Г. Валиев, С.Н. Власов, В.П. Самойлов. – М.: ТА Инжиниринг, 2003. – 74 с.
2. Пастушков, Г.П. К вопросу о выборе вида тоннелепроходческого механизированного щитового комплекса с активным пригрузом забоя / Г.П. Пастушков, В.А. Кузьмицкий // Автомобильные дороги и мосты. – 2013. – № 1 (11). – С. 77-82.
3. Анализ рабочего процесса тоннелепроходческого комплекса. Часть 2. Исследование процесса проходки на основе математической модели и экспериментальных данных / Г.В. Казаченко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 47-58.
4. Косаревич, И.В. Сапропелевые буровые растворы / И.В. Косаревич, Н.Н. Битюков, В.Ш. Шмавомянц. – Минск: Наука и техника, 1987. – 191 с.
5. Охрана окружающей среды и природопользование. Недра. Сапропель. Промышленно-генетическая классификация: СТБ 17.04.02-01-2010. – Введ. 01.12.10. – Минск: Госстандарт: ГНУ «Ин-т природопользования НАН Беларуси», 2010. – 6 с.
6. Буровой раствор: а.с. 1749225 SU / В.А. Евецкий, А.А. Гонцов, А.И. Вареца и др.; Всес. науч.-иссл. геологоразв. ин-т. угольн. месторожд. – № 4790232/03; заявл. 08.02.90; опубл. 23.07.92 // Открытия. Изобрет. – 1992. – № 27.
7. Ковш канатного скрепера для добычи сапропеля : пат. 17661 Респ Беларусь, МПК E02F 3/54 / Б.В. Курзо, О.М. Гайдукевич, В.Ф. Лебедев, Г.А. Басалай; заявитель ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси». – № a20111066; заявл. 04.08.11; опубл. 30.06.13 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 2.

**Basalai I.A.**

### **Studying the possibility of using sapropel based drilling mud fluid in the tunnel-boring mechanized complex**

*The main methods of underground utilities construction with driving mechanized complexes are analyzed. Operation modes of actuating mechanisms of technological machines in the interaction with the rock taking into account the influence of drilling mud fluid on their performance properties are studied. The analysis of the main drilling fluids is carried out. The composition and properties of sapropel are studied and the possibility of its use as the main component of the drilling mud in the tunnel complex is shown.*

*Keywords:* driving complex, tunnel, drilling fluid, sapropel.

Поступила в редакцию 19.02.2018 г.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.65.01

**СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ В ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЕ  
ПРИ НАЧАЛЬНОЙ ЗАКРУТКЕ НАРУЖНОГО ПОТОКА СРЕДЫ**

Павлечко В.Н. (УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь)

*Проведен анализ сил, возникающих в центробежной турбине, а также скоростей движения рабочего колеса и среды в нем при неизменном угле наклона лопастей по ходу движения среды и при начальной закрутке наружного потока. Получены выражения для определения скорости движения среды под действием закрученного потока и центробежной силы, а также давлений, создаваемых ими. Приведены графические зависимости отношений скоростей движения среды в турбине к начальной скорости среды и к окружной скорости турбины, а также создаваемых средой и центробежной силой давлений от направления потока и угла наклона лопастей.*

**Ключевые слова:** центробежная турбина, угол наклона лопастей, направление наружного потока, скорости среды, давление среды, центробежная сила.

**Введение**

Основным уравнением центробежной машины является уравнение Эйлера [1, 2], в котором отражена только тангенциальная составляющая скорости движения среды, не учитывается энергия потери давления при движении среды в радиальном направлении и энергия центробежной силы [3].

В работах [4] проведен анализ сил воздействия радиального потока среды, движущегося от центра к периферии, на лопасть центробежной турбины. Получены выражения для определения скоростей движения среды, окружной скорости турбины и давления, создаваемого рабочей средой, от угла наклона лопастей. Рассмотрено также влияние центробежной силы, которая создает часть давления, препятствующего движению среды в радиальном направлении. Определено, что известное уравнение Эйлера отражает только часть общего давления, созданного средой, и не учитывает потери давления по преодолению сопротивления лопастей в радиальном направлении и сопротивления от действия центробежной силы.

Рабочая среда может вводиться в корпус турбины тангенциально или проходить через направляющий аппарат, в результате чего она приобретает некоторое вращательное движение. В настоящей работе проводится анализ влияния угла наклона лопастей и направления потока среды на параметры работы центробежной турбины при движении среды от периферии к центру.

**Результаты исследований**

Рассмотрим отдельную лопасть, обозначенную точками 1, 2, расположенную под углом  $\beta$  к направлению окружной скорости (рисунок 1). Причем угол наклона лопасти сохраняет свое значение по радиусу турбины.

Поток среды вводится снаружи и воздействует на элементарный участок лопасти АВ со скоростью  $v_s$  под углом  $\alpha$  к направлению, обратному направлению ок-

ружной скорости. Под влиянием среды лопасть приобретает вращение относительно оси О с угловой скоростью  $\omega$ .

Представим скорость движения среды  $v_s$  в виде двух составляющих: скорости  $v_{sr}$ , направленной радиально от периферии к оси вращения, и скорости  $v_{su}$ , направленной в сторону окружной скорости  $u$  турбины (рисунок 2). Величины этих скоростей зависят от направления вводимого потока:

$$v_{sr} = v_s \sin \alpha; \quad (1)$$

$$v_{su} = v_s \cos \alpha. \quad (2)$$

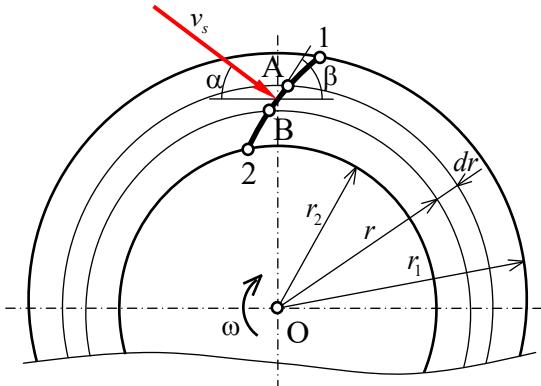


Рисунок 1. – Схема воздействия среды на лопасть турбины

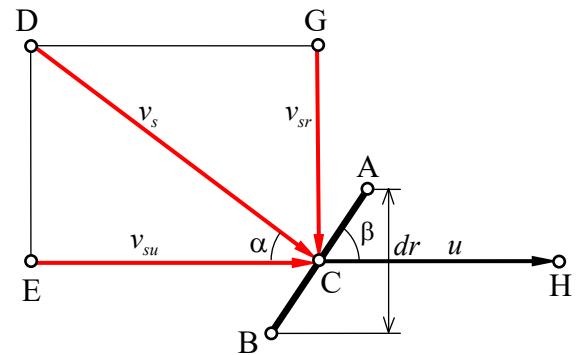


Рисунок 2. – Составляющие скорости воздействия на элементарную площадку

Влияние среды, движущейся со скоростью  $v_{sr}$ , рассмотрено в работе [4]. В результате воздействия на элементарную площадку потока с силой  $dF_{sr}$  возникает реакция этого участка лопасти  $dF'$  (отрезок CG на рисунке 3), перпендикулярная плоскости лопасти, которая представлена двумя величинами, направленными радиально  $dF'_r$  и тангенциально  $dF'_u$  и показанными на рисунке 3 отрезками СК и СН.

Поскольку турбина вращается равномерно, то реакция рассматриваемого участка и ее составляющие уравновешиваются соответствующими силами воздействия среды (отрезки CL, CN и CM на рисунке 3). На площадку воздействует также сила  $dF'_w$ , направленная вдоль лопасти (отрезок CO). Под воздействием перечисленных сил микрообъем среды перемещается со скоростями  $c'$ ,  $c'_r$  и  $c'_u$  в направлениях, соответственно, перпендикулярном плоскости лопасти, радиальном и тангенциальном, а также со скоростью  $w'$  – вдоль лопасти (рисунок 4). Кроме того, под действием центробежной силы среда перемещается от оси вращения к периферии со скоростью  $c'_u$  (на рисунке 4 не показана), равной скорости ее перемещения в тангенциальном направлении.

Выражения для расчета перечисленных скоростей определены в работе [4] и с учетом принятых обозначений имеют вид:

$$c' = v_{sr} \cos \beta; \quad (3)$$

$$c'_r = v_{sr} \cos^2 \beta; \quad (4)$$

$$c'_u = c'_u = v_{sr} \sin \beta \cos \beta; \quad (5)$$

$$w' = v_{sr} \sin \beta; \quad (6)$$

$$u' = v_{sr} \frac{\cos \beta}{\sin \beta}. \quad (7)$$

Все обозначения в формулах и на рисунках расшифрованы в конце статьи в условных обозначениях.

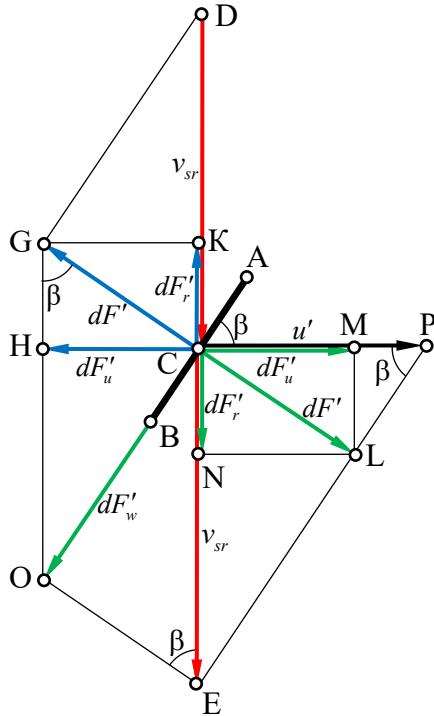


Рисунок 3. – Силы при радиальном воздействии среды на элементарную площадку лопасти

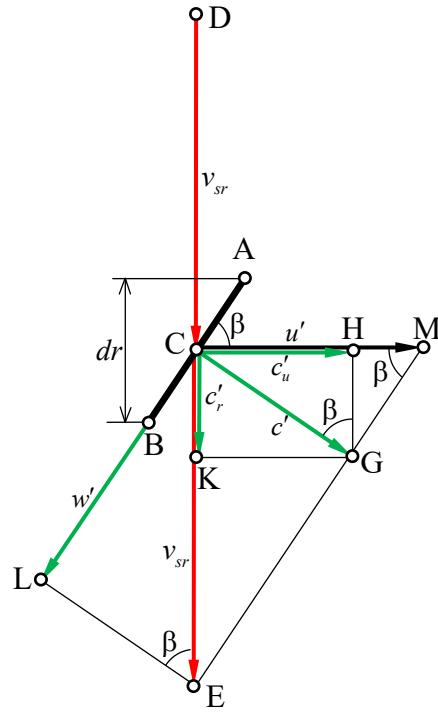


Рисунок 4. – Скорости движения среды и площадки под воздействием радиальной составляющей потока

Давление среды на лопасть в направлениях, перпендикулярном плоскости лопасти, радиальном и тангенциальном, а также давление от действия центробежной силы определены в работе [4] и рассчитываются по зависимостям, видоизмененным в соответствии с принятыми обозначениями:

$$P' = \rho v_{sr}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (8)$$

$$P'_r = \rho v_{sr}^2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (9)$$

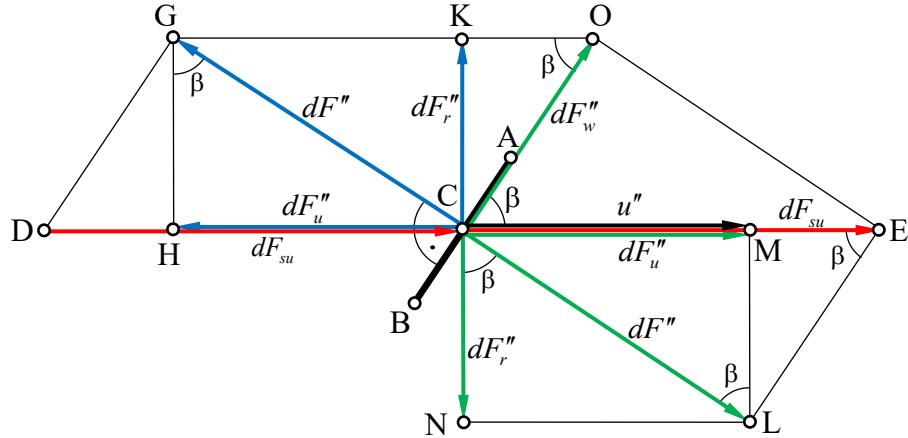
$$P'_u = \rho v_{sr}^2 \cos^2 \beta; \quad (10)$$

$$P'_w = \rho \frac{v_{sr}^2}{2} \sin^2 \beta \cos^2 \beta. \quad (11)$$

Влияние тангенциальной составляющей потока среды на параметры турбины рассмотрено в работе [5].

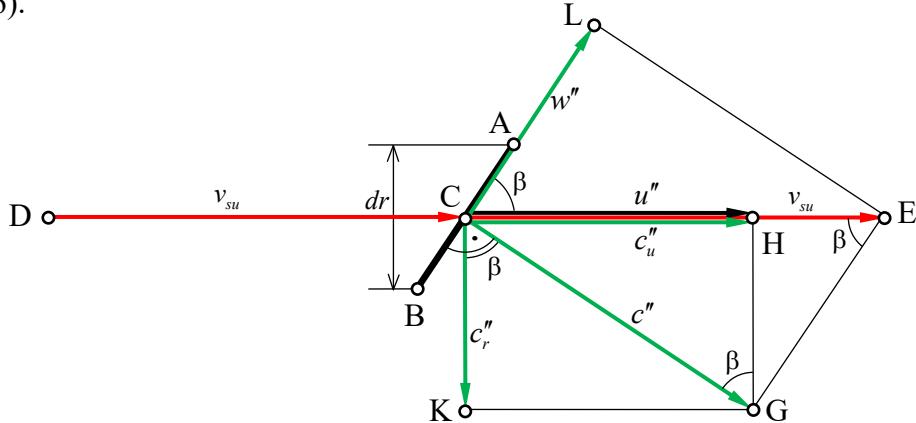
На элементарную площадку АВ действует тангенциальный поток среды с силой  $dF_{su}$  (отрезок CD на рисунке 5). Под его воздействием возникает реакция лопасти  $dF''$  (отрезок CG), перпендикулярная плоскости лопасти, которая представлена в виде двух составляющих: силы  $dF''_r$ , направленной радиально от оси вращения, и силы  $dF''_u$ , действующей тангенциально, противоположно направлению окружной скорости турбины  $u''$  (отрезки СК и СН на рисунке 5). Перечисленные силы реакции лопасти уравновешиваются соответствующими силами воздействия среды (отрезки CL, CN и CM на

рисунке 5), для чего расходуется некоторое количество энергии среды. На элементарный объем среды действует также сила  $dF_w''$ , направленная вдоль лопасти (отрезок CO).



**Рисунок 5. – Силы при тангенциальном воздействии среды на элементарную площадку лопасти**

Под действием указанных сил среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, со скоростью  $c''$ , в радиальном направлении –  $c_r''$ , в тангенциальном направлении –  $c_u''$  и вдоль лопасти –  $w''$  (отрезки CG, CK, CH и CL на рисунке 6).



**Рисунок 6. – Скорости движения среды и площадки под воздействием тангенциальной составляющей потока**

Приведенные на рисунке 6 скорости геометрически взаимосвязаны. Скорость движения среды  $c''$ , является геометрической суммой скоростей  $c_u''$  и  $c_r''$ , а скорость  $v_{su}$  – геометрической суммой скорости движения среды  $c''$  и относительной скорости среды  $w''$ . Из взаимосвязи скоростей в работе [5] получены выражения:

$$c'' = v_{su} \sin \beta; \quad (12)$$

$$c_r'' = v_{su} \sin \beta \cos \beta; \quad (13)$$

$$c_u'' = v_{su} \sin^2 \beta; \quad (14)$$

$$w'' = v_{su} \cos \beta; \quad (15)$$

$$u'' = c_u'' = v_{su}. \quad (16)$$

Давление, создаваемое средой в указанных выше направлениях, выражается соответственно зависимостями, полученными в работе [5]:

$$P'' = \rho v_{su}^2; \quad (17)$$

$$P_r'' = \rho v_{su}^2 \cos^2 \beta; \quad (18)$$

$$P_u'' = \rho v_{su}^2 \sin^2 \beta; \quad (19)$$

$$P_u'' = \rho \frac{v_{su}^2}{2}. \quad (20)$$

По аналогии с методикой, приведенной в работе [5], результирующие значения параметров работы радиальной турбины могут быть найдены сложением соответствующих величин, полученных при раздельном вводе радиальной и тангенциальной составляющих движения потока. Зависимости скоростей движения среды и турбины с учетом выражений (1) и (2), а также отрицательной величины угла  $\alpha$ , имеют вид:

$$c = c' + c'' = v_s \sin(\beta + \alpha); \quad (21)$$

$$c_r = c'_r + c''_r = v_s \sin(\beta + \alpha) \cos \beta; \quad (22)$$

$$c_u = c'_u + c''_u = v_s \sin(\beta + \alpha) \sin \beta; \quad (23)$$

$$w = w' - w'' = v_s \cos(\beta + \alpha); \quad (24)$$

$$c_u = c'_u + c''_u = v_s (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta); \quad (25)$$

$$u = u' + u'' = v_s \frac{\sin(\beta + \alpha)}{\sin \beta}. \quad (26)$$

Относительные скорости  $w'$  и  $w''$  противоположны по направлению, и положительное значение скорости  $w'$  в зависимости (24) выбрано, исходя из совпадения направления проекции этой скорости на касательную к турбине с окружной скоростью  $u$ .

С учетом уравнения (26) скорости движения среды по формулам (21)-(25), выраженные через окружную скорость турбины, равны:

$$c = u \sin \beta; \quad (27)$$

$$c_r = u \sin \beta \cos \beta; \quad (28)$$

$$c_u = u \sin^2 \beta; \quad (29)$$

$$w = u \frac{\cos(\beta + \alpha)}{\sin(\beta + \alpha)} \sin \beta; \quad (30)$$

$$c_u = u \frac{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}{\sin(\beta + \alpha)} \sin \beta. \quad (31)$$

Зависимости давлений, выраженные через скорость потока  $v_s$ , с учетом (1) и (2) имеют вид:

$$P = P' + P'' = \rho v_s^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta}; \quad (32)$$

$$P_r = P'_r + P''_r = \rho v_s^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha); \quad (33)$$

$$P_u = P'_u + P''_u = \rho v_s^2 (\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha); \quad (34)$$

$$P_u = \rho \frac{v_s^2}{2} (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta)^2, \quad (35)$$

а выраженные через окружную скорость турбины  $u$ :

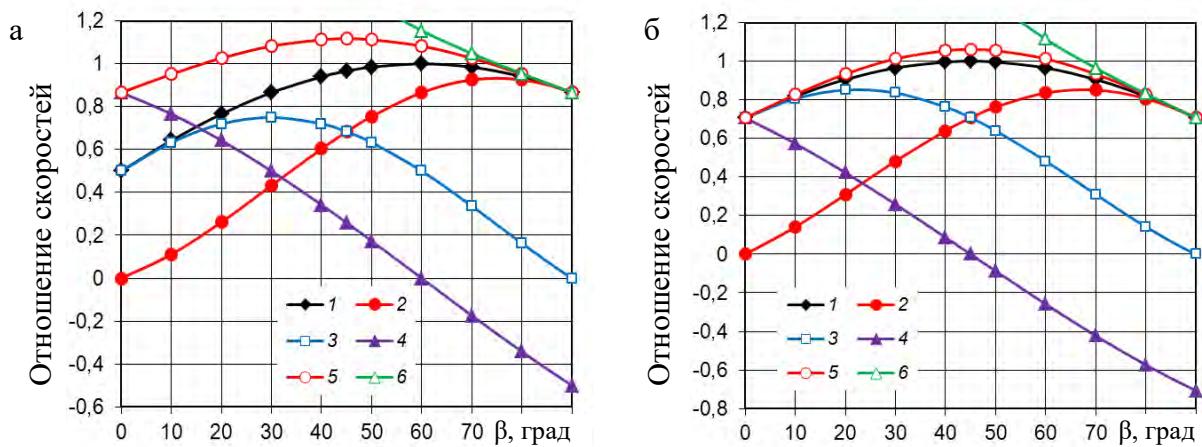
$$P = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)}; \quad (36)$$

$$P_r = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta + \alpha)} \cos^2 \beta; \quad (37)$$

$$P_u = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} \sin^2 \beta; \quad (38)$$

$$P_u = \rho \frac{u^2}{2} \frac{(\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta)^2}{\sin^2(\beta - \alpha)} \sin^2 \beta. \quad (39)$$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (21)-(26) к начальной скорости движения среды  $v_s$  от угла наклона  $\beta$  аналогичны рисункам, полученным при вводе в турбину закрученного потока среды изнутри и приведенным в работе [5]. Для подтверждения этого на рисунке 7 приведены некоторые графики для углов  $\alpha = 30^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$ , которые аналогичны соответственно рисункам 7б и 7в в статье [5]. Эти рисунки различаются только углами  $\alpha$ : в первом случае они имеют положительные значения, во втором – отрицательные. Также аналогичны графические зависимости давлений от начальной скорости среды и угла наклона лопасти, приведенные на рисунках 8а и 8б, с кривыми на соответствующих рисунках 9б и 9в в работе [5]. Соответствующие графики отличаются знаками угла  $\alpha$  и кривыми 5, повышенные значения которых в работе [5] обусловлены меньшими сопротивлениями перемещению среды ввиду совпадения направлений движения среды и центробежной силы.



а –  $\alpha = 30^\circ$ ; б –  $\alpha = 45^\circ$ ; 1 –  $c/v_s$ ; 2 –  $c_u/v_s$ ; 3 –  $c_r/v_s$ ; 4 –  $w/v_s$ ; 5 –  $c_u/v_s$ ; 6 –  $u/v_s$

Рисунок 7. – Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей

при различных углах  $\alpha$

Определенный интерес представляют графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (21)-(26) к начальной скорости движения среды  $v_s$  от угла  $\alpha$  наклона потока среды, приведенные на рисунке 9. Отношения скоростей  $c/v_s$ ,  $c_r/v_s$  и  $c_u/v_s$  с увеличением угла  $\alpha$  возрастают, достигают максимума при  $\alpha = 90 - \beta$ , а затем снижаются. При  $\beta = 45^\circ$   $c_u/v_s = c_r/v_s$ , и кривые 2 и 3 на рисунке 9б совпадают. Отношение  $w/v_s$  непрерывно уменьшается, становится равным нулю при указанном выше соотношении углов, а затем становится отрицательным, т.е. относи-

тельная скорость среды меняет свое направление. Отношение  $c_u/v_s$  сопоставимо с отношениями других скоростей. Окружная скорость турбины может быть больше начальной скорости среды, особенно для малых углов  $\beta$ .

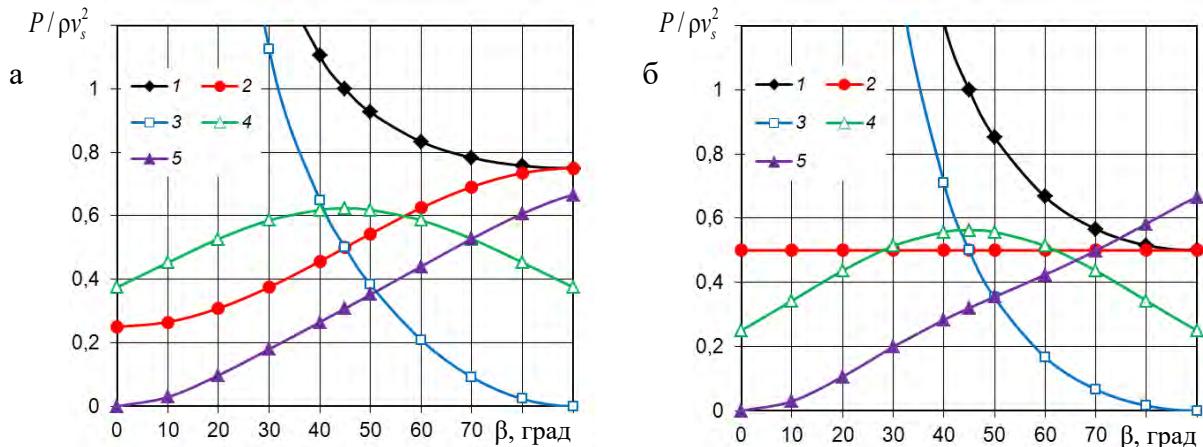


Рисунок 8. – Зависимости отношений давлений от угла наклона лопастей при различных углах  $\alpha$

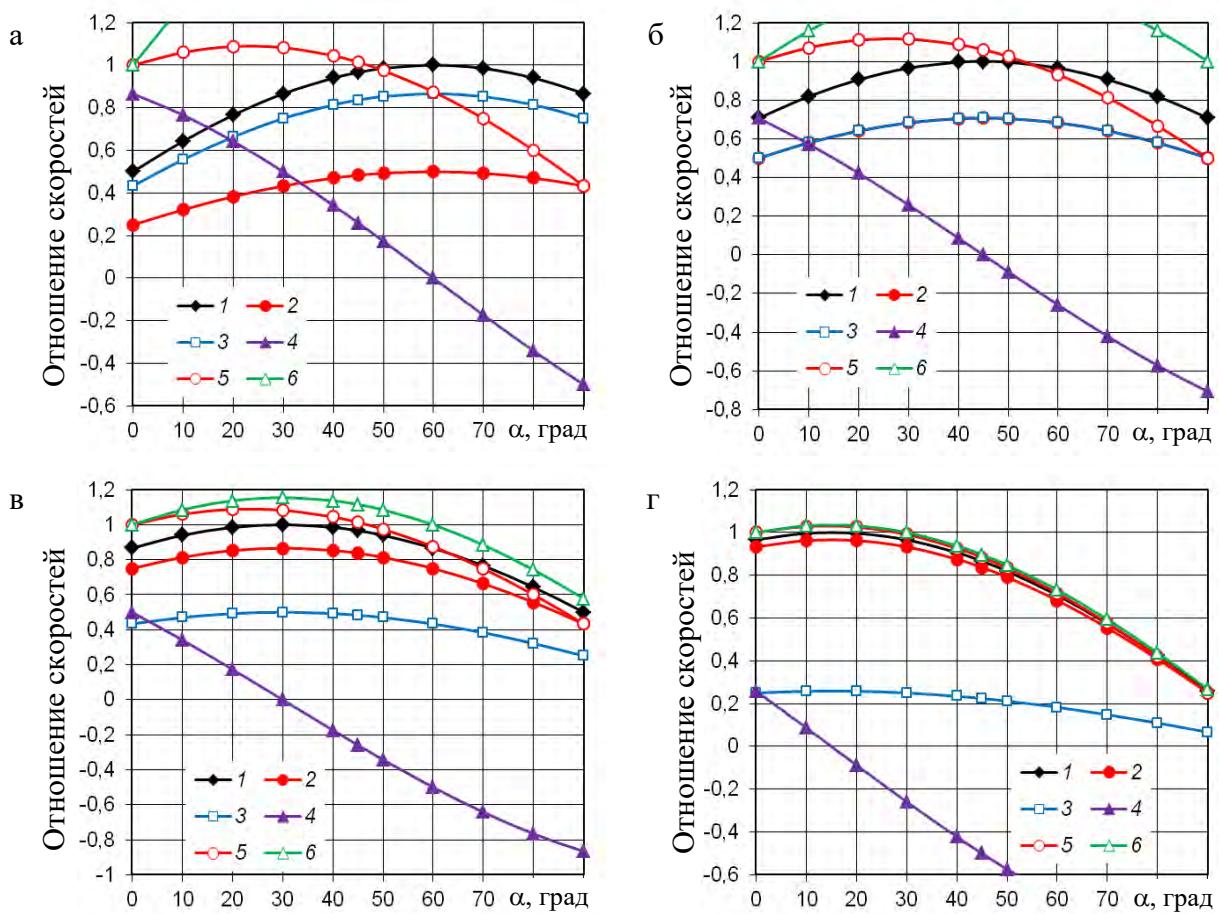
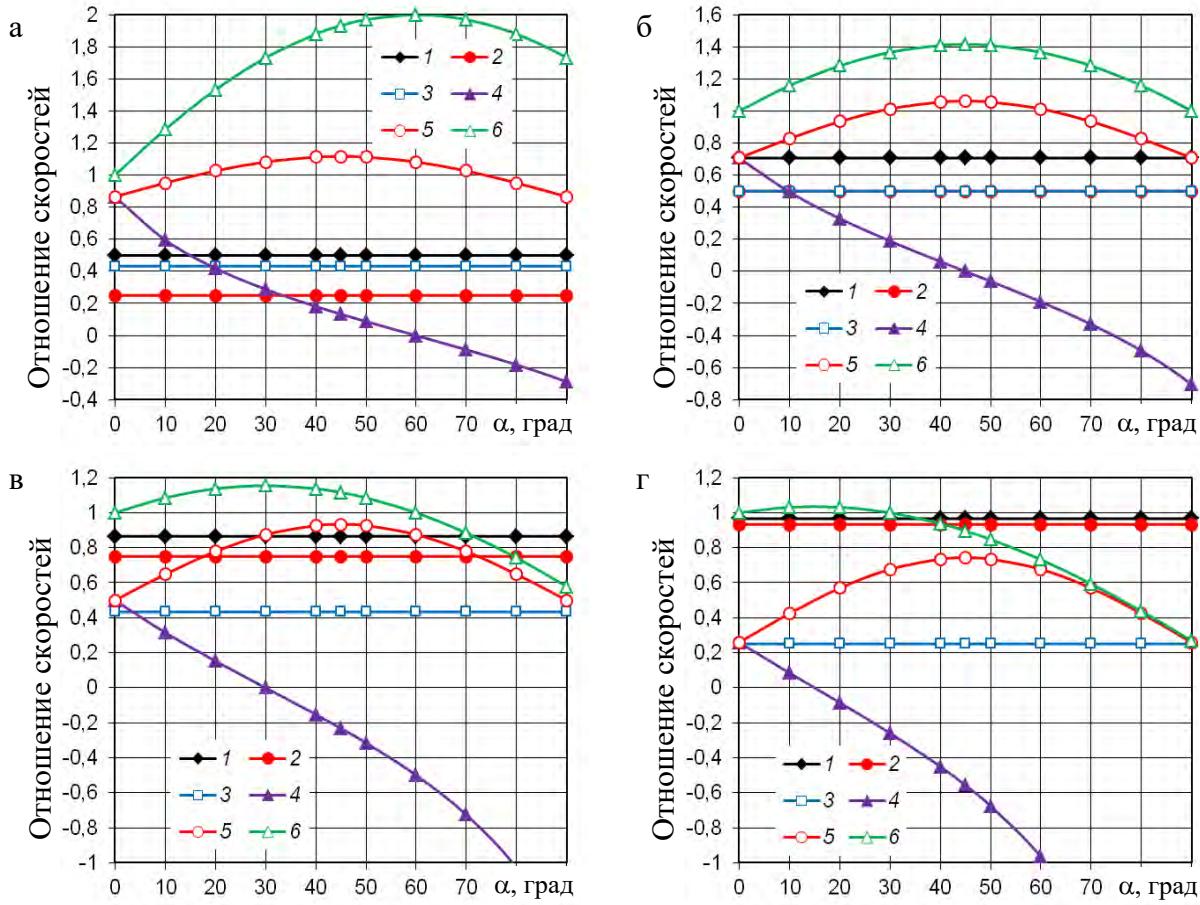


Рисунок 9. – Зависимости отношений скоростей от угла  $\alpha$  при различных углах  $\beta$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (27)-(31) к окружной скорости турбины  $u$  от угла  $\alpha$  приведены на рисунке 10.



$$\text{а} - \beta = 30^\circ; \text{б} - \beta = 45^\circ; \text{в} - \beta = 60^\circ; \text{г} - \beta = 75^\circ;$$

$$1 - c/u; 2 - c_u/u; 3 - c_r/u; 4 - w/u; 5 - c_w/u; 6 - v_s/u$$

Рисунок 10. – Зависимости отношений скоростей от угла  $\alpha$  при различных углах  $\beta$

Отношения скоростей  $c/u$ ,  $c_r/u$  и  $c_u/u$  постоянны при изменении  $\alpha$  и представлены на рисунке 10 горизонтальными линиями вследствие того, что скорости  $c$ ,  $c_r$ ,  $c_u$  и  $u$  в одинаковой степени зависят от угла  $\alpha$ . При  $\beta = 45^\circ$   $c_u/u = c_r/u$ , и кривые 2 и 3 на рисунке 10б совпадают. Отношение  $c_u/u$  максимально при  $\alpha = 45^\circ$ . Относительная скорость среды меняет направление на противоположное при указанных выше соотношениях углов ( $\alpha = 90 - \beta$ ). При малых углах наклона лопастей движение среды под действием центробежной силы может превышать окружную скорость турбины. При малых углах наклона лопастей радиальная скорость больше тангенциальной, при  $\beta = 45^\circ$  – равна ей, а при больших  $\beta$  – меньше.

Графическое изображение отношений давлений в центростремительной турбине в соответствии с формулами (32)-(35) к произведению плотности среды на квадрат начальной скорости среды от угла  $\alpha$  приведено на рисунке 11.

По мере возрастания угла  $\alpha$  полезное давление  $P_u$ , вызывающее вращение турбины, и давление  $P_r$ , расходуемое на преодоление сопротивления лопасти, возрастают для  $\beta < 45^\circ$ , равны для  $\beta = 45^\circ$  (прямые 2 и 3 на рисунке 11б совпадают) и снижаются для  $\beta > 45^\circ$ . Причем в первом случае  $P_u < P_r$ , а во втором, наоборот –  $P_u > P_r$ . Поэтому для более эффективного использования энергии среды предпочтительнее большие зна-

чения  $\beta$  и малые величины  $\alpha$ . Однако, при этом имеют место значительные давления, создаваемые центробежной силой, для преодоления которых также необходимо расходовать некоторое количество энергии среды. Кривая 5 отражает отношение полезной энергии, затрачиваемой на вращение турбины, к суммарной энергии, передаваемой турбине, в том числе и для преодоления сопротивления лопастей и действия центробежной силы.

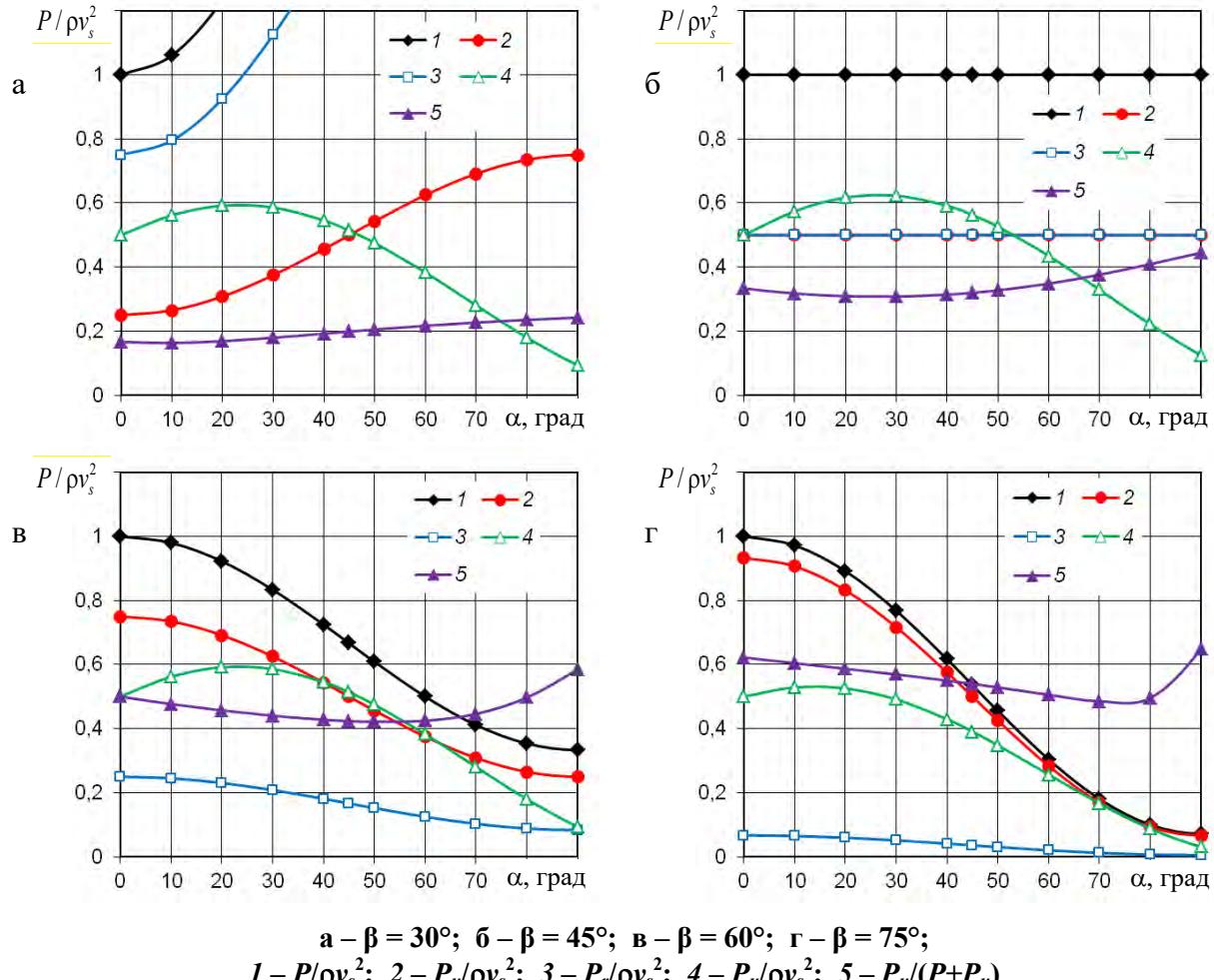
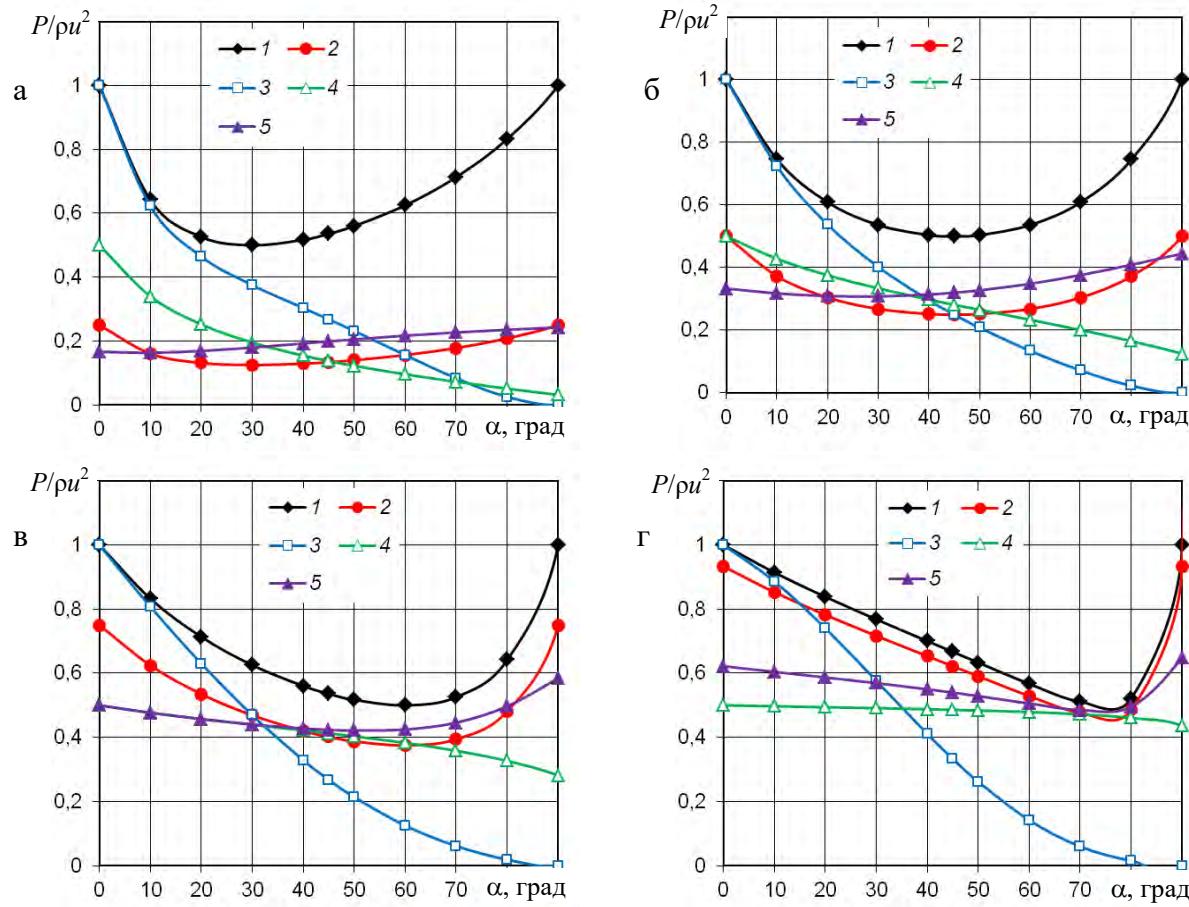


Рисунок 11. – Зависимости отношений давлений от угла  $\alpha$  при различных углах  $\beta$

Графическое изображение отношений давлений, развиваемых в центростремительной турбине, в соответствии с формулами (36)-(39), к произведению плотности среды на квадрат окружной скорости турбины от угла  $\alpha$  приведено на рисунке 12.

Полное давление, воспринимаемое турбиной, по мере увеличения угла  $\alpha$  первоначально снижается, достигает минимума при  $\alpha = 90 - \beta$ , а затем повышается. Аналогичным образом изменяется отношение  $P_u / \rho u^2$ . Сопротивление лопасти и центробежной силы (отношения соответственно  $P_r / \rho u^2$  и  $P_u / \rho u^2$ ) при возрастании  $\alpha$  непрерывно снижаются. Давление, создаваемое центробежной силой, сопоставимо по величине с другими давлениями, и для его преодоления необходимо затратить существенную часть энергии среды.

Полученные формулы отражают теоретические аспекты работы центростремительной турбины и справедливы при отсутствии потерь энергии на трение.



а –  $\beta = 30^\circ$ ; б –  $\beta = 45^\circ$ ; в –  $\beta = 60^\circ$ ; г –  $\beta = 75^\circ$ ;  
 1 –  $P/\rho u^2$ ; 2 –  $P_u/\rho u^2$ ; 3 –  $P_r/\rho u^2$ ; 4 –  $P_u/\rho u^2$ ; 5 –  $P_u/(P+P_u)$

Рисунок 12. – Зависимости отношений давлений от угла  $\alpha$  при различных углах  $\beta$

### Выводы

При увеличении угла наклона направления потока среды отношения  $c/v_s$ ,  $c_u/v_s$  и  $c_r/v_s$  повышаются до величин  $\alpha = 90 - \beta$ , а затем снижаются. Отношения  $c/u$ ,  $c_u/u$  и  $c_r/u$  не зависят от угла  $\alpha$ . По мере увеличения угла  $\alpha$  отношения  $P/\rho v_s^2$ ,  $P_u/\rho v_s^2$  и  $P_r/\rho v_s^2$  возрастают для  $\beta < 45^\circ$  и снижаются для  $\beta > 45^\circ$ . При возрастании угла  $\alpha$  отношения  $P/\rho u^2$  и  $P_u/\rho u^2$  снижаются для  $\alpha = 90 - \beta$  и в дальнейшем повышаются, а отношения  $P_r/\rho u^2$  и  $P_u/\rho u^2$  непрерывно снижаются. Для более эффективного использования энергии среды предпочтительнее большие углы наклона лопастей и малые углы направления потока среды.

### Список использованных источников

1. Смирнов, И.Н. Гидравлические турбины и насосы / И.Н. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1969. – С. 85-88.
2. Кривченко, Г.И. Гидравлические машины. Турбины и насосы / Г.И. Кривченко. – М.: Энергия, 1978. – С. 69-72.

3. Павлечко, В.Н. Влияние угла наклона лопастей на давление радиального нагнетателя / В.Н. Павлечко, С.К. Протасов // Химическая промышленность. – 2014. – № 5, т. 91. – С. 252-258.
4. Павлечко, В.Н. Зависимость параметров центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2016 – № 4. – С. 35-43.
5. Павлечко, В.Н. О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 52-65.

### **Условные обозначения**

$\alpha$  – угол наклона потока среды к направлению, обратному окружной скорости, град;  
 $\beta$  – угол между плоскостью лопасти и направлением окружной скорости, град;  
 $c$  – скорость движения среды, м/с;  
 $F$  – сила, Н;  
 $P$  – давление, Па;  
 $r$  – радиус турбины, м;  
 $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $u$  – окружная скорость турбины, м/с;  
 $v$  – начальная скорость среды, м/с;  
 $w$  – относительная скорость среды, м/с;  
 $\omega$  – угловая скорость турбины, рад/с.

Индексы:

$r$  – радиальный;  
 $s$  – среда;  
 $u$  – тангенциальный;  
 $\zeta$  – центробежный;  
1 – вход в межлопастное пространство;  
2 – выход из межлопастного пространства.

---

**Pavlechko V.N.**

### **Velocities and pressures in an inward-flow turbine with initial swirling of the outer fluid flow**

*The forces existing in an inward-flow turbine, velocities of the wheel and the fluid in it were analyzed for the conditions of a constant blade angle and initial swirling of the outer fluid flow. Equations describing the fluid velocity associated with the swirled flow and centrifugal force and the corresponding pressure were derived. Velocity of a fluid flow in the turbine was graphically presented as a function of initial fluid velocity and peripheral velocity of the turbine. Similarly, pressures exerted by the fluid and centrifugal force were presented as functions of the flow direction and blade angle.*

*Keywords: inward-flow turbine; blade angle; outer flow direction; fluid velocity; fluid pressure; centrifugal force.*

Поступила в редакцию 22.12.2017 г.

---

УДК 621.926.32-026.335(045)(476)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА СТЕПЕНЬ ИЗМЕЛЬЧЕННОСТИ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сотник Л.Л. (УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь), Сиваченко Л.А. (УО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

*В статье представлены результаты исследований влияния отдельных факторов на процесс измельчения материалов в вибровалковом измельчителе. Выведено уравнение регрессии и обоснованы рациональные параметры процесса измельчения. Показана принципиально новая конструкция измельчителя.*

**Ключевые слова:** *вибровалковый измельчитель, измельчение материалов, эксцентрикситет, степень измельченности, планирование эксперимента.*

### Введение

Природные материалы составляют основу сырьевой базы промышленности строительных материалов. Измельчение является подготовительной стадией переработки материалов к участию их в последующих физико-химических взаимодействиях с целью получения новых продуктов и изделий. Процесс измельчения является одним из самых массовых и энергоемких, но при этом – самым несовершенным из всех используемых в технике [1, 2].

Анализ литературы показывает, что в последние годы во многих отраслях промышленности для дробления и помола строительных и горнорудных материалов с различными физико-механическими характеристиками широко используются пресс-валковые агрегаты, реализуемые по различным технологическим схемам [3-6].

Разрушения исходного продукта в таких агрегатах происходит путем прохода слоя материала между цилиндрическими измельчающими поверхностями, где образуется критическая зона и развивается сжимающее усилие, превосходящее предел прочности материала [7, 8].

Проведенный анализ литературы показал, что вопросы о влиянии величины зазора между валками и скоростей вращения валков на процесс измельчения материалов, имеющих различную структуру и физико-механические характеристики, изучены недостаточно, а вопрос влияния вибрационного воздействия не изучен вовсе. Все это подтверждается противоречивостью известных данных в этих областях. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные на эти вопросы не решают всех задач, что в свою очередь не способствует процессу измельчения.

Данное обстоятельство с учетом современных требований к вопросам энергоэффективности и ресурсосбережения при переработке материалов определяет актуальность поиска более точных ответов на вопросы влияния величины зазора, относительной скорости вращения валков и вибрационного воздействия.

Одним из новых конструкторских решений по разработке измельчителей повышенной энергонапряженности воздействия на частицы разрушаемого материала, является предложенный нами вибровалковый измельчитель.

В нем реализуется совместное вибрационное (ударное) и раздавливающее-сдвиговое воздействие на материал за счет придания одному из валков дополнительного движения эксцентрично относительно его центральной оси.

### Постановка задачи

Цель данной работы: обоснование рекомендаций по выбору величины зазора, относительной скорости вращения валков и величины эксцентрикитета (оказывающей вибрационное воздействие на материал) для повышения эффективности технологической операции измельчения различных материалов по критерию минимума затрат энергии.

В соответствии с поставленной целью и с учетом необходимости уточнения известных по литературе данных определены следующие задачи.

1. Провести экспериментальное исследование влияния трех факторов (величины зазора, относительной скорости вращения валков и величины эксцентрикитета) на степень измельченности материала.
2. С использованием полученных данных разработать рекомендации по выбору величины зазора, скоростей вращения валков и величины эксцентрикитета.
3. Обосновать рациональную область использования вибровалкового измельчителя.

### Условия и методы исследования

На процесс измельчения различных строительных материалов в вибровалковом измельчителе влияет множество факторов: усилие измельчения, зависящее от зазора между валками  $b$ ; отношение скоростей вращения валков  $K_{fp} = n_1/n_2$ ; значения величины эксцентрикитета  $e$ ; частоты колебаний эксцентрикового валка  $v$ . Кроме того, на эффективность измельчения влияют также физико-механические характеристики измельчаемых материалов: средневзвешенный диаметр исходных частиц  $d_{0cp}$ ; их механическая прочность  $\sigma_{сж}$ ; а также, характеристики, определяющие технологический режим измельчения: степень измельченности материала  $\eta_{изм}$ ; удельная поверхность измельченного продукта  $S$  [3].

Вышеуказанные характеристики и параметры полностью реализуются в разработанной нами конструкции вибровалкового измельчителя и определяются режимами его работы.

Для проведения физических опытов по определению влияния величины зазора  $b$ ,

скоростей вращения валков  $n_1$  и  $n_2$  и величины эксцентрикитета  $e$  на степень измельченности  $\eta_{изм}$  была использована лабораторная установка (рисунок 1), принцип действия которой описан в статьях [9, 10].

В качестве измельчаемого материала был использован пенобетон 1100 (прочностью 6,3 МПа). Измельчаемый материал имел средневзвешенный диаметр частиц  $d_{0cp}$ , мм. Материал подвергался измельчению, после чего определялся средневзвешенный диаметр частиц  $d_{icp}$ , мм.



**Рисунок 1. – Лабораторная установка вибровалкового измельчителя**

Средневзвешенный диаметр частиц определялся по формуле:

$$d_{icp} = \frac{m_1 d_{cp,1} + m_2 d_{cp,2} + \dots + m_i d_{cp,i}}{m_1 + m_2 + \dots + m_i},$$

где  $d_{cp,1}$ ,  $d_{cp,2}$ , ...,  $d_{cp,i}$  – среднеарифметический диаметр частиц заданного диапазона фракций, м;

$m_1$ ,  $m_2$ , ...,  $m_i$  – процентное содержание в продукте каждой фракции, %.

Гранулометрический состав измельченных частиц определялся при помощи «Вибропросеивающей машины» (Вибротехник ВП-30) с помощью набора сит № 10, 7; 5; 3; 2; 1; 0,5 и 0,25 мм.

Для контроля качества измельченного продукта измерялась также его удельная поверхность – прибор ПСХ-11 [1].

Степень измельченности опытного материала определялась по формуле:

$$\eta_{изм} = \left( 1 - \frac{d_{icp}}{d_{0cp}} \right) 100 \%$$

Для взвешивания проб измельченного материала использовались лабораторные весы «Scout Pro» (весы измеряют и отображают на дисплее значения массы, погрешность 1 г).

Для построения математической модели, описывающей процесс измельчения материалов, нами использовались методы математического планирования эксперимента [11-14], которые позволяют учесть большое количество факторов, влияющих на процесс измельчения материалов в вибровалковом измельчителе, а также необходимость установления их совокупного влияния на выходные технологические параметры агрегата – степень измельченности материала  $\eta_{изм}$  [3].

Наиболее универсальной для каких-либо откликов и факторов считается функция регрессии в виде отрезков ряда Тейлора. Функция отклика аппроксимируется в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{(n-1)n} x_{(n-1)n} + b_{11} x_1^2 + \dots + b_{nn} x_n^2,$$

где  $y$  – расчетное значение параметра оптимизации;

$b_0$ ,  $b_1$ , ...,  $b_n$  – коэффициенты регрессии, которые определяются статистическим путем на основании эксперимента;

$x_i$  – кодовая переменная, причем  $x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i$ ;

$\Delta X_i$  – натуральное значение интервала варьирования  $i$ -ого фактора;

$X_i$  – натуральное значение уровня  $i$ -ого фактора ( $X_{0i}$  – основной уровень).

Кодовая переменная может иметь значения  $+a$ ;  $-1$ ;  $0$ ;  $+1$ ;  $-a$ . Такое кодирование переменных удобно при экспериментальных исследованиях, поскольку обработка исследуемых данных используется в стандартной форме, независимо от конкретных условий задачи, что значительно упрощает вычисления. Для увеличения общего числа точек вводят так называемые звездные точки.

В исследовании используем центральное композиционное планирование (ЦКП), в котором параметром оптимизации принимаем границы степени измельченности материала  $\eta_{изм}$ , а влияющими факторами:  $X_1$  – зазор между валками  $b$ , мм;  $X_2$  – величина эксцентрикитета  $e$ , мм;  $X_3$  – отношение скоростей вращения  $K_{\phi p}$ .

Проведем кодирование факторов для перевода натуральных факторов в безразмерные величины с целью построения план-матрицы эксперимента. Уровни варьирования факторов (таблица 1) выбраны по результатам анализа известных по литературе [3-8] теоретических и экспериментальных исследований.

Таблица 1. – Уровни варьирования факторов

| Факторы                                   | Кодированное обозначение | Шаг варьирования | Уровни варьирования |     |     |     |        |
|---|--------------------------|------------------|---------------------|-----|-----|-----|--------|
|   |                          |                  | -1,125              | -1  | 0   | 1   | +1,125 |
| Зазор между валками $b$ , мм              | $x_1$                    | 1                | 0,8                 | 1   | 2   | 3   | 3,2    |
| Величина эксцентрикитета $e$ , мм         | $x_2$                    | 1                | 0,8                 | 1   | 2   | 3   | 3,2    |
| Отношение скоростей вращения $K_{\phi p}$ | $x_3$                    | 0,2              | 0,55                | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,05   |

Для такого центрального композиционного планирования уравнение регрессии имеет вид полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2.$$

## **Результаты исследований и их обсуждение**

По результатам исследований получена выборка данных о степени измельченности материала  $\eta_{изм}$  в процессе измельчения образцов (таблица 2). Значения исследуемых факторов изменяли в соответствии с планом эксперимента (таблица 1) и повторяли опыты.

Таблица 2. – Ортогональный план второго порядка

| № опыта        |    | Кодовая переменная |        |        | Параметр оптимизации |       |       | Среднее значение |
|----------------|----|--------------------|--------|--------|----------------------|-------|-------|------------------|
|                |    | $x_1$              | $x_2$  | $x_3$  | $y_1$                | $y_2$ | $y_3$ |                  |
| Точки ПФЭ      | 1  | 1                  | 1      | 1      | 77,26                | 78,98 | 80,37 | 78,87            |
|                | 2  | 1                  | 1      | -1     | 74,55                | 75,15 | 76,98 | 75,56            |
|                | 3  | 1                  | -1     | 1      | 80,95                | 82,66 | 83,26 | 82,29            |
|                | 4  | 1                  | -1     | -1     | 80,16                | 80,29 | 82,7  | 81,05            |
|                | 5  | -1                 | 1      | 1      | 79,03                | 81,31 | 80,95 | 80,43            |
|                | 6  | -1                 | 1      | -1     | 78,15                | 79,96 | 80,96 | 79,69            |
|                | 7  | -1                 | -1     | 1      | 86,35                | 86,72 | 88,92 | 87,33            |
|                | 8  | -1                 | -1     | -1     | 86,31                | 87,1  | 88,82 | 87,41            |
| Звездные точки | 9  | -1,215             | 0      | 0      | 88,61                | 86,26 | 86,16 | 87,01            |
|                | 10 | 1,215              | 0      | 0      | 79,18                | 79,49 | 81,96 | 80,21            |
|                | 11 | 0                  | -1,215 | 0      | 85,76                | 88,18 | 87,66 | 87,2             |
|                | 12 | 0                  | 1,215  | 0      | 78,73                | 79,88 | 81,54 | 80,05            |
|                | 13 | 0                  | 0      | -1,215 | 82,65                | 80,26 | 82,19 | 81,7             |
|                | 14 | 0                  | 0      | 1,215  | 82,45                | 82,76 | 84,69 | 83,3             |
| Нулевая точка  | 15 | 0                  | 0      | 0      | 83,25                | 84,51 | 86,04 | 84,6             |

Статистическая обработка данных выполнена общепринятыми методами математической статистики для 5 %-го уровня значимости с использованием программного пакета Microsoft Office Excel 2007. Было получено уравнение регрессии (модель) второго порядка:

$$y = 83,3 - 2,3x_1 - 2,9x_2 + 0,7x_3 + 0,7x_1x_2 + 0,5x_1x_3 + 0,4x_2x_3 - 0,8x_1^2 - 0,8x_2^2 - 1,5x_3^2.$$

Адекватность модели проверялась с помощью  $F$ -критерия Фишера:

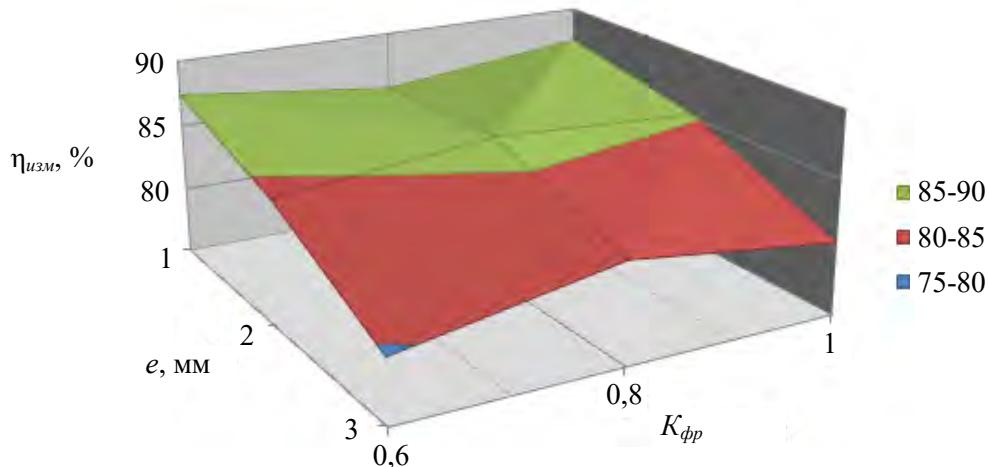
$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = \frac{3,8}{1,83} = 2,077,$$

где  $s_{ad}^2$  – дисперсия неадекватности математической модели;

$s_y^2$  – дисперсия ошибки опыта.

Табличное значение  $F$ -критерия Фишера для 5 %-го уровня значимости  $F_{0,05} = 2,1$  при степенях свободы  $f_1 = 30$  и  $f_2 = 11$  превышает величину опытного значения этого критерия. Поэтому гипотезу об адекватности представления результатов эксперимента можно принять.

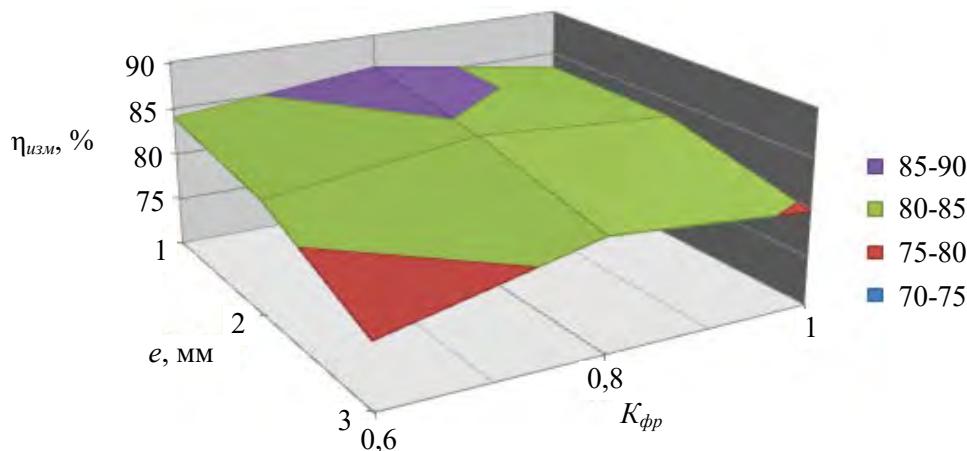
На рисунках 2-4 представлены графики поверхности отклика критерия оптимизации  $\eta_{изм}$ , показывающие влияние факторов величины эксцентризитета  $e$ , величины зазора  $b$  и относительной скорости вращения  $K_{\phi p}$ , которые наглядно отображают область оптимальных значений данных факторов.



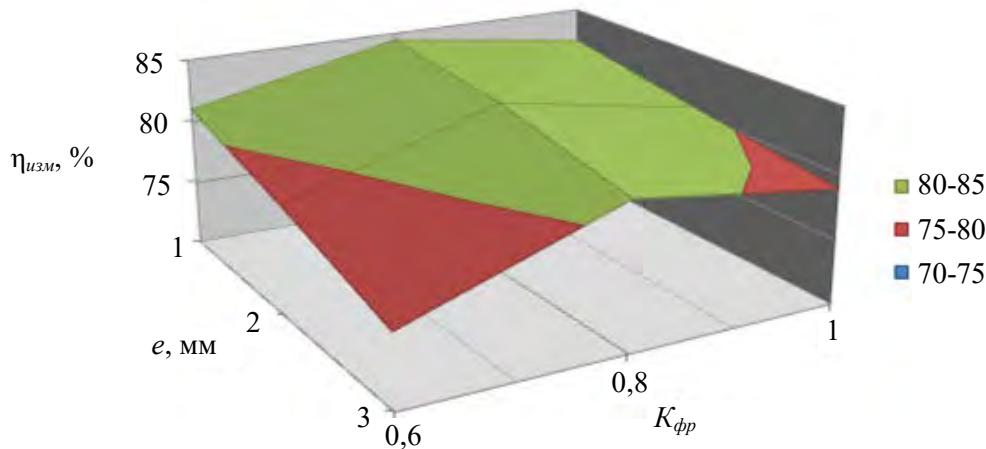
**Рисунок 2. – График поверхности отклика критерия оптимизации  $\eta_{изм}$  при величине зазора  $b = 1$  мм**

Для проверки достоверности результатов был проведен контрольный эксперимент при оптимальных значениях факторов. Было получено оптимальное значение  $\eta_{изм} = 85,55$  для зазора 1 мм,  $\eta_{изм} = 84,37$  для зазора 2 мм,  $\eta_{изм} = 83,15$  для зазора 3 мм. Относительная ошибка в сравнении с приведенным в таблице 2 значением составила  $\sim 5\%$ .

Результаты повторного эксперимента при полученных по модели оптимальных значениях факторов согласуются с результатами расчета по этой модели, а сама модель достоверно описывает процесс измельчения рассмотренных образцов.



**Рисунок 3. – График поверхности отклика критерия оптимизации  $\eta_{изм}$  при величине зазора  $b = 2$  мм**



**Рисунок 4. – График поверхности отклика критерия оптимизации  $\eta_{изм}$  при величине зазора  $b = 3$  мм**

### Заключение

Таким образом, с применением методики планирования многофакторного эксперимента получены оптимальные значения факторов, позволяющие уменьшить затраты энергии на измельчение материалов, а значит, и повысить эффективность данного процесса.

Регрессионная модель, прошедшая проверку на адекватность и значимость коэффициентов, может быть применена для решения различных практических задач, основными из которых являются:

- нахождение экстремальных условий протекания процесса, модель которого построена;
- определение значений отклика в той части факторного пространства, где эксперимент не проводится, т.е. либо интерполяция, либо экстраполяция (прогнозирования) отклика.

Проведенные исследования могут быть использованы для проектирования вибровалковых измельчителей промышленного назначения с целью селективного измельчения материалов.

### Список использованных источников

1. Лесовик, В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород / В.С. Лесовик. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2006. – 526 с.

2. Селективное измельчение минералов / В.И. Ревнивцев [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
3. Романович, А.А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов: монография / А.А. Романович, А.В. Колесников. – Белгород: БГТУ, 2011. – 165 с.
4. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. – 2003. – Vol. 34, № 4. – P. 15.
5. Poliad, M. A look at internel grinding shop / M. Poliad, P. Coonet // World Cement. – 1990. – № 9. – P. 395-399.
6. The world's largest roller mills // Internetional cement review. – 2000. – № 1. – P. 43-44.
7. Bogdanov, V.S. The Power Consumption Calculation of a Ball Drum Mill / V.S. Bogdanov, S.I. Antsiferov, N.E. Bogdanov // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – № 10, Т. 18. – С. 1448-1454.
8. Богданов, В.С. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице / В.С. Богданов, А.А. Романенко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 1. – С. 53-57.
9. Сиваченко, Л.А. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник // Вестник БарГУ, Серия Технологические науки. – 2017. – Вып. 5. – С. 87-92.
10. Сиваченко, Л.А. Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, И.А. Богданович // Наукоемкие технологии и инновации. Часть 4: Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: сб. докладов Междунар. научно-практ. конф. / БГТУ. – Белгород, 2016. – С. 179-185.
11. Зенгинидзе, И.Т. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Т. Зенгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
12. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю.П. Адлер [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
13. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С.Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 45 с.
14. Дропсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Дропсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 512 с.

---

**Sotnik L.L., Sivachenko L.A.**

**The analysis of the influence of definite factors on degree of grinding in the vibrating-rolling grinder by the method of mathematical planning of the experiment**

*The article presents the results of research of the influence of definite factors on the process of materials grinding in a vibrating-rolling grinder. The regression equation is formulated and the rational parameters of the grinding process are substantiated. A fundamentally new design of the grinder is described.*

*Keywords: vibrating-rolling grinder, materials grinding, eccentricity, degree of grinding, experiment planning.*

Поступила в редакцию 19.01.2018 г.

УДК 621.879:629.02

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ БЫСТРОСЪЕМНЫХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В КОНСТРУКЦИЯХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Довгяло В.А., Пупачев Д.С. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

*Проведен анализ конструкций и представлена классификация быстросъемных соединительных устройств (БСУ) к одноковшовым экскаваторам. На примере выбранной машины выполнено компьютерное моделирование влияния нагрузок при разработке грунтов I-IV категорий и различных углов резания на металлоконструкции БСУ и рабочего оборудования одноковшового экскаватора. Установлено значительное снижение нагрузок на рабочие органы экскаватора с использованием БСУ.*

**Ключевые слова:** экскаватор, ресурсосбережение, быстросъемное соединительное устройство, 3D-моделирование, оценка эффективности.

### Введение

Гидравлические одноковшовые экскаваторы (ГОЭ) являются одним из наиболее распространенных и востребованных видов землеройной техники из-за их универсальности, мобильности и производительности.

На данный момент на рынке дорожно-строительных машин представлено большое количество моделей ГОЭ (в том числе и отечественных), различных по своим характеристикам и типоразмерам. Конкуренция, борьба за покупателя, а также жесткие требования экологической безопасности и ресурсосбережения требуют от производителей экскаваторной техники постоянного совершенствования своей продукции. Ведущие мировые машиностроительные компании стремятся повысить эффективность и конкурентоспособность выпускаемой техники. Можно выделить три основных направления развития конструкций гидравлических одноковшовых экскаваторов [1-3]:

- технологическое, обусловленное увеличением функциональности и технических характеристик машин;
- эксплуатационное, связанное с улучшением возможностей по эксплуатации, обслуживанию и ремонту машин, а также снижением загрязнения окружающей среды;
- технико-экономическое, связанное со снижением затрат при производстве работ и увеличением производительности машин.

Среди наиболее заметных тенденций в конструкциях землеройных машин (применение гибридных приводов, силовых установок с повышенными мощностными и экологическими характеристиками, гидросистем с номинальным давлением до 40 МПа и т.д.) следует отметить повышение их общей функциональности и эффективности. С этой целью для большинства производимых одноковшовых экскаваторов разработана и представлена на рынке широкая номенклатура универсальных и специализированных рабочих органов.

Так, серийно выпускаемые в настоящее время на территории РБ предприятиями ОАО «Амкодор» и ОАО Жлобинский механический завод «Днепр» одноковшовые экскаваторы III-й и IV-й размерных групп на пневмоколесном и гусеничном ходу (серий 814, 914 и 923; EW-1901 и ET-2301) могут комплектоваться ковшами типа «обратная лопата» вместимостью от 0,32 до 0,65 м<sup>3</sup> для разработки грунтов с I по IV категории.

Помимо этого они могут использовать рабочее оборудование, произведенное сторонними фирмами-производителями (гидромолоты, гидроножницы, рыхлители и т.д.).

Многообразие сменного оборудования обуславливает значительные потери времени при замене одного рабочего органа на другой. Выходом из данной ситуации стало применение в конструкциях рабочего оборудования экскаваторов быстросъемных соединительных устройств или квик-каплеров. Данные устройства относительно дешевы, легко адаптируются под имеющееся навесное оборудование и позволяют производить его замену только усилиями оператора экскаватора, сокращая время простоев машины. Кроме того, они дают возможность избавиться от необходимости содержания обширного разнородного парка дорожно-строительной техники, что очень актуально для небольших коммунальных и строительных предприятий.

### **Анализ конструкций быстросъемных соединительных устройств**

Традиционно все БСУ изготавливают непосредственно под присоединительные размеры экскаватора и подразделяют на шесть размерных групп, выделяя показатели рабочего давления, межосевые размеры, ширину рукояти и массу.

Проведенный анализ современных быстросъемных соединительных устройств позволяет составить их классификацию по конструктивным и функциональным признакам. На сегодняшний день все выпускаемые БСУ по принципу действия делятся на три основные группы (рисунок 1): механические, гидравлические, автоматические.



**а – механический; б – гидравлический; в – автоматический**

**Рисунок 1. – Основные виды БСУ по принципу действия**

Принцип действия механических БСУ основан на применении соединений винт-гайка: за счет вращения винта с помощью специального инструмента захватный элемент совершает поступательное движение, и, в зависимости от направления вращения, происходит либо установка навесного оборудования, либо его отсоединение. Кроме того, существуют механические быстросъемы, принцип действия которых основан на применении упругих элементов в виде пружин. Пружинная конструкция более технологична и при этом имеет относительно простой и надежный механизм.

В устройствах гидравлического типа работа по замыканию и размыканию выполняется гидросистемой экскаватора. В самом устройстве имеется гидрозамок – гидравлический цилиндр с запирающими клапанами, приводящий в движение затвор при навешивании и снятии навесного оборудования.

В автоматических устройствах, состоящих из быстросъема и адаптера, смонтированы гидромосты с быстроразъемными соединениями. Как следствие, при смене гидронавесного оборудования оно не только захватывается и фиксируется квик-каплером, но и соединяется необходимым количеством указанных выше соединений с гидросистемой машины в автоматическом режиме.

По возможности использования навесного оборудования в прямом или обратном режиме работы все БСУ делятся на две основные группы:

- симметричные быстросменные системы, которые дают возможность использовать навесное оборудование как в обратном (обратная лопата), так и в прямом режиме работы (прямая лопата);

- асимметричные быстросменные системы, обеспечивающие возможность использования навесного оборудования (ковшей) только в режиме работы обратная лопата.

Кроме того, все быстросменные системы можно разделить по универсальности на две группы:

- адаптерные, не зависящие от посадочных мест навесного оборудования экскаваторов и позволяющие использовать любое навесное оборудование на экскаваторах независимо от производителя (рисунок 1в);

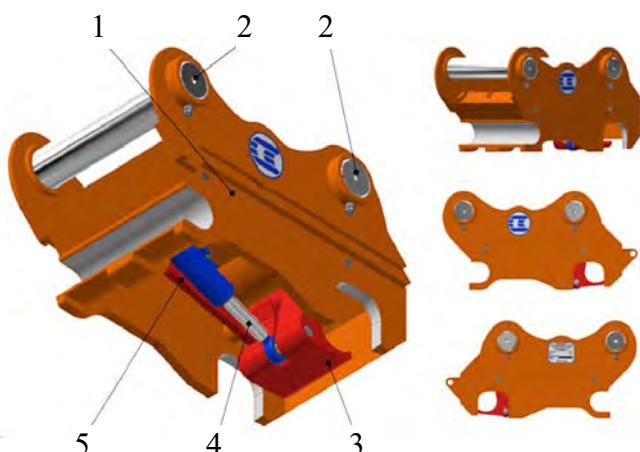
- посадочные, используемые для захвата рабочего оборудования с соответствующими посадочными размерами (рисунки 1а, 1б).

Адаптерные быстросъемные соединительные устройства состоят из двух основных компонентов: квик-каплера и адаптера, устанавливаемого на навесное оборудование.

Посадочные БСУ по своему устройству не имеют значительных конструктивных различий. Они состоят из переднего жесткого и заднего подвижного захвата с определенным посадочным диаметром под пальцы сменных рабочих органов.

Одним из важных направлений развития БСУ является совершенствование их систем безопасности. Оно реализуется путем применения полной автоматизации процесса захвата и удержания, использованием систем двойной и даже тройной фиксации, электронных блокировочных систем и т.д. Однако спрос на полностью автоматизированные системы невелик, поскольку большинство предприятий имеют в своем распоряжении небольшую номенклатуру сменных рабочих органов для собственного парка землеройной техники, а стоимость таких устройств достаточно велика. Как следствие, наиболее популярными на данный момент типами БСУ остаются механические и гидравлические.

### Разработка 3D-модели и компьютерное моделирование



1 – корпус; 2 – пальцы; 3 – крюк-захват;  
4 – гидроцилиндр с гидрозамком;

5 – фиксатор (предохранительный механизм)  
Рисунок 2. – Модель разработанного устройства

Разработка модели (рисунок 2) велась в пакете программ Autodesk Inventor. Для разработки модели быстросъемного соединительного устройства были взяты параметры конструкции квик-каплера гидравлического типа [4].

За базовую машину для модернизации был принят экскаватор АМКОДОР 814, ввиду его многофункциональности и маневренности, а также конструктивной схожести с линейкой экскаваторов серии ЕК-14 (рисунок 3).



**Рисунок 3. – Экскаватор Амкодор 814**

Процесс создания 3D-модели устройства включает последовательную разработку элементов его конструкции – корпуса, механизма фиксации, гидроцилиндра с гидрозамком и предохранительного механизма – с учетом известных присоединительных размеров для рабочего оборудования принятого экскаватора, и последующую их сборку посредством сборочных зависимостей.

Компьютерное моделирование заключалось в проведении расчета на прочность методом конечных элементов. С этой целью была создана тестовая сборка рукояти (914-03.02.000) длиной 1,9 м и рабочего органа базового экскаватора – ковша экскавационного (914-03.06.000) для разработки грунтов IV категории вместимостью 0,65 м<sup>3</sup>.

Расчет произведен для двух вариантов рабочего оборудования (с установленным БСУ и без него), режимы нагружения выбраны для различных типов грунтов (I-IV категорий) и углов резания ковшом (25-40°).

Для выполнения расчета на прочность исследуемых элементов конструкции были подобраны материалы с необходимыми свойствами. После этого средствами Autodesk Inventor было выполнено построение конечной элементной сетки.

Следующим этапом является расстановка связей и нагрузок, включающих в себя силы сопротивления резанию грунта (определенны предварительно при помощи программы, созданной в пакете Microsoft Excel), действующих на исследуемые элементы, и непосредственно сам анализ.

В ходе расчетов конструкции определены:

- максимальные напряжения по Мизесу;
- максимальные смещения;
- минимальный коэффициент запаса прочности.

Результаты расчета убеждают в работоспособности модели. Установлено, что уменьшение углов резания грунта с 40° до 25° позволяет снизить как внешние нагрузки, так внутренние напряжения в металлоконструкции БСУ и рабочего оборудования ГОЭ более чем на 7 %. Это приводит к снижению необходимого усилиякопания и требуемых для разработки грунтов мощностных характеристик базовой машины, что сопровождается снижением расхода топливно-смазочных материалов.

Установка БСУ в процессе работы позволяет также уменьшить напряжения в рукояти почти на 20 %, что в конечном итоге обеспечивает повышение общей работоспособности экскаватора, снижение вероятности поломки металлоконструкций и, как следствие, расходов на ремонт базовой машины.

Результаты расчетов представлены на графиках (рисунки 4 и 5).

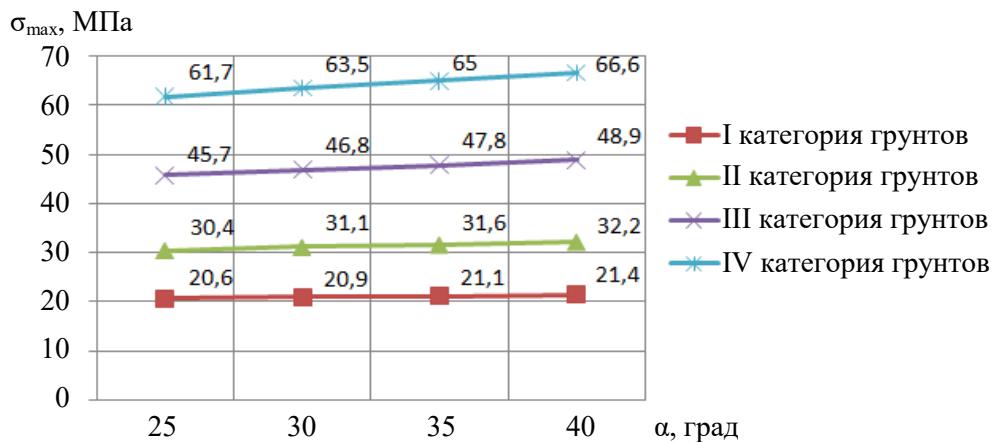


Рисунок 4. – Влияние угла резания грунта  $\alpha$  ковшом на внутренние напряжения  $\sigma_{\max}$  в конструкции квик-каплера

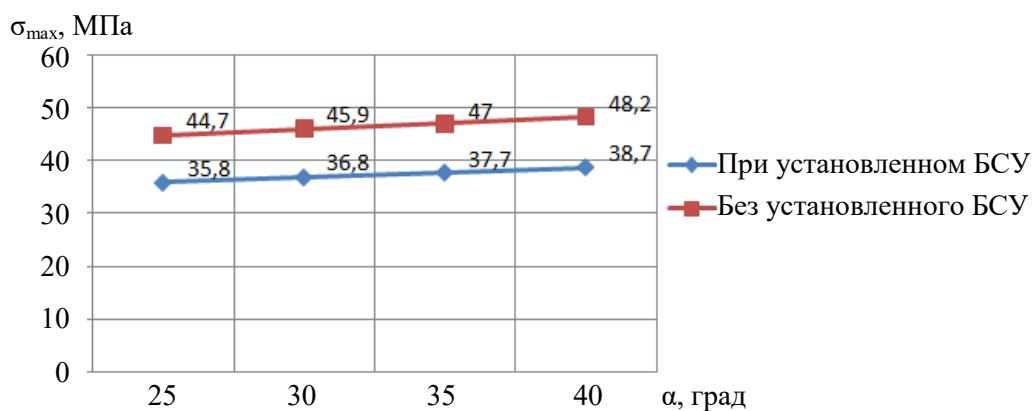


Рисунок 5. – Сравнение напряжений, возникающих в металлоконструкции рукояти ГОЭ тестовых сборок

На данный момент точные расчетные методики оценки производительности при использовании БСУ отсутствуют. Тем не менее, в общем случае эксплуатационную производительность  $\Pi_e$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) можно рассчитать по следующей формуле [5]:

$$\Pi_e = 3600 \cdot \frac{\kappa_e \kappa_{upr} \kappa_u}{\kappa_p} \cdot \frac{q_k}{T_u},$$

где  $\kappa_e$  – коэффициент использования по времени;

$\kappa_{upr}$  – коэффициент, учитывающий эффективность управления и квалификацию машиниста;

$\kappa_u$  – коэффициент наполнения ковша;

$\kappa_p$  – коэффициент разрыхления грунта;

$q_k$  – вместительность ковша,  $\text{м}^3$ ;

$T_u$  – продолжительность рабочего цикла, с.

Наличие БСУ учтено за счет повышения коэффициента  $\kappa_{upr}$ , учитывающего эффективность управления экскаватором, включая замену сменного рабочего оборудования. При этом  $\kappa_{upr}$  будет стремиться к единице. С учетом вышеизложенного, установка БСУ при росте  $\kappa_{upr}$  с 0,95 до 0,99 позволяет повысить эксплуатационную производительность экскаватора с  $95 \text{ м}^3/\text{ч}$  (техническая характеристика базового экскаватора) до  $104,2 \text{ м}^3/\text{ч}$ , т.е. почти на 10 %.

## Выводы

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. Установка быстросъемного соединительного устройства на рукояти гидравлического одноковшового экскаватора позволяет при разработке грунтов I-IV категорий уменьшить напряжения в рабочем оборудовании почти на 20 %.

2. Конструкция БСУ обеспечивает значительное увеличение запаса прочности рабочего оборудования при эксплуатации с учетом типоразмера экскаватора и устройства, технологии земляных работ и категории разрабатываемого грунта. Так, максимальные напряжения в элементах конструкции (по Мизесу) не превышают 66,6 МПа при минимальном коэффициенте запаса прочности, составляющем 3,75, и максимальном смещении 1,398 мм.

3. Установлено значительное снижение внешних нагрузок и внутренних напряжений (более чем на 7 %) в конструкции БСУ при изменении угла резания режущей кромки ковша экскаватора в интервале от 40° до 25° при разработке грунта.

4. Применение БСУ позволяет значительно улучшить работоспособность и технико-эксплуатационные характеристики одноковшового экскаватора (производительность, топливно-смазочную экономичность и др.).

## Список использованных источников

1. Guthrie, S. Track and Wheels / S. Guthrie // Construction Europe. – 2016. – № 10. – С. 33-38.
2. Moore, W. Crawler Excavators / W. Moore // Construction Equipment. – 2011. – № 5. – С. 54-64.
3. Добронравов, С.С. Строительные машины и основы автоматизации. Учебник для строительных вузов / С.С. Добронравов, В.Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
4. Quick coupler for bucket excavators: пат. US 6422805 B1, МПК E02F3/32 / Garry Miller (GB). – US 09/337,447; заявл. 21.06.99; опубл. 23.07.02. – 18 с.
5. Довгяло, В.А. Машины для земляных работ. Практикум: учеб. пособие / В.А. Довгяло, А.М. Щемелев, Ю.А. Шебзухов; М-во транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т. трансп. – Гомель: БелГУТ, 2016. – 391 с.

---

**Dovgyalo V.A., Pupachou D.S.**

**Analysis of quick-detachable coupling devices application possibilities in constructions of domestic excavators**

*The analysis of structures is carried out and the classification of quick couplers for single-bucket excavators is presented. On the example of a selected machine, computer simulation of the effect of loads during the excavation of I-IV grade soils and various cutting angles on the metal structures of the quick coupler and the working equipment of a single bucket excavator was accomplished. A significant reduction in the load on the excavator's working parts using the quick coupler is established.*

**Keywords:** excavator, resource-saving, quick-detachable coupling device, 3D-modeling, efficiency evaluation.

Поступила в редакцию 29.01.2018 г.

---

УДК 531.312.1

## **РАСЧЕТ УРАВНЕНИЯ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ С УЧЕТОМ СИЛ ТЯЖЕСТИ И ЗАДАННОЙ НАЧАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ МАЯТНИКА**

Локтионов А.В. (УО «Витебский государственный технологический университет», г. Витебск, Беларусь)

*В статье рассмотрен расчет уравнения малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью движения маятника с учетом сил тяжести ползуна и шарика. Для расчета частоты колебаний использованы инерционные и квазиупругие коэффициенты дифференциальных уравнений малых колебаний системы с двумя степенями свободы. Получены уравнение свободных колебаний маятника и закон движения ползуна в зависимости от времени и заданной начальной угловой скорости вращения маятника.*

**Ключевые слова:** расчет, дифференциальные уравнения, малые колебания, частота, маятник, закон движения, ползун.

### **Введение**

В работах [1-3] получены дифференциальные уравнения гармонических колебаний эллиптического маятника, состоящего из ползуна, шарика и стержня. При этом используется координатный способ задания движения ползуна и шарика. Принято, что в начальный момент ползун находится в покое, угловая скорость вращения шарика равна нулю, угол отклонения не равен нулю. Для решения использовано уравнение Лагранжа. При этом принято, что на маятник не действует сила тяжести, и потенциальная энергия системы равна нулю.

Анализом работ по составлению дифференциальных уравнений гармонических колебаний эллиптического маятника установлено, что не произведены исследования по расчету малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения. При этом преимущественно используется координатный способ задания движения ползуна и шарика [1, 2]. В работах [4-6] дана сравнительная оценка методов расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника, предложен аналитический метод исследований малых колебаний с учетом момента инерции маятника, рассмотрено сложное движение эллиптического маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения. С учетом принятых начальных условий получены уравнения движения ползуна и малых колебаний маятника. Установлено, что расчетная формула, определяющая закон движения малых колебаний маятника с учетом момента инерции, имеет громоздкий вид. Это объясняется тем, что центр масс шарика не совпадает с осью подвеса, и усложняется формула по расчету кинетической энергии маятника, а следовательно, и системы в целом [4].

Если шарик принять за материальную точку, участвующую в сложном движении, то значительно упрощаются решения уравнений Лагранжа и уравнения, выражающего закон движения малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения [5]. В работе [5] представлены траектории перемещения центров масс ползуна, шарика и эллиптического маятника. В работах [1-5] принято, что на маятник не действуют силы тяжести и потенциальная энергия  $P = 0$ .

В работе [6] предложен кинетостатический метод расчета уравнения движения малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения.

Принято, что на маятник действуют силы тяжести ползуна и шарика. В работе [7] для расчета динамической реакции направляющих ползуна использована теорема о движении центра масс системы. Принцип Даламбера можно использовать при подсчете уравнения движения ползуна [6]. Для определения реакций ползуна составлена расчетная схема. Для упрощения расчета реакции [7] составляется условие равновесия в виде суммы проекций приложенных к ползуну сил на ось, перпендикулярную стержню маятника.

При расчете уравнения движения малых колебаний маятника с учетом сил тяжести в работе [8] составлены уравнения Лагранжа второго рода. Принято, что в начальный момент ползун находится в покое, угловая скорость вращения шарика равна нулю, угол отклонения не равен нулю.

При расчете уравнения движения малых колебаний с учетом сил тяжести и заданной начальной угловой скорости движения маятника не проведены расчеты частоты колебаний с использованием инерционных и квазиупругих коэффициентов дифференциальных уравнений малых колебаний системы с двумя степенями свободы [9]. Инерционные коэффициенты называют обобщенной или приведенной массой, а квазиупругие коэффициенты – обобщенным коэффициентом жесткости [10].

### Расчет уравнения движения малых колебаний маятника

Рассмотрим расчет уравнения движения малых колебаний маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения. При этом принято, что на маятник действуют силы тяжести ползуна и шарика.

Эллиптический маятник состоит из ползуна 1 весом  $P_1$ , помещающегося без трения по горизонтальной прямой, и шарика 2 весом  $P_2$ , соединенного с ползуном нерастяжимым стержнем АВ длины  $l$ . Стержень вращается вокруг оси А, связанной с ползуном и перпендикулярной плоскости рисунка. Определим малые колебания маятника (рисунок), принимаем, что в начальный момент  $\varphi = \varphi_0 = 0$ , а угловая скорость  $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_0 \neq 0$ .

Выберем в качестве обобщенных координат перемещение ползуна по горизонтальной плоскости ( $q_1 = x$ ) и угол поворота стержня АВ вокруг оси А ( $q_2 = \varphi$ ).

Так как действующие на систему силы потенциальные, то уравнения Лагранжа представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} = 0; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Определим кинетическую энергию системы:  $T = T_1 + T_2$ , где кинетическая энергия ползуна 1 в поступательном движении  $T_1 = \frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{P_1}{2g} \dot{x}^2$ , и кинетическая энергия

маятника  $T_2 = \frac{m_2}{2} V_2^2$ . Так как маятник совершает сложное движение, то  $\vec{V}_2 = \vec{V}_e + \vec{V}_r$ .

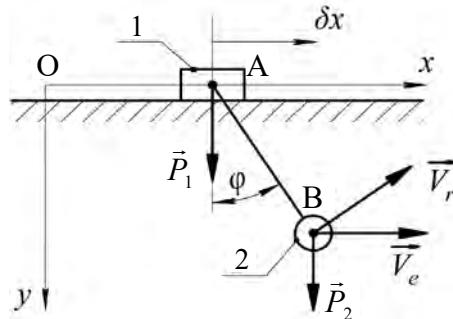


Рисунок. – Расчетная схема  
движения эллиптического маятника

Переносная скорость  $\vec{V}_e$  направлена параллельно оси  $x$ , при этом  $V_e = \dot{x}$ , а вектор  $\vec{V}_r$  относительной скорости перпендикулярен АВ и численно  $V_r = l\dot{\phi}$ .

Тогда абсолютная скорость маятника:

$$V_2^2 = V_e^2 + V_r^2 + 2V_e V_r \cos \varphi = \dot{x}^2 + l^2 \dot{\phi}^2 + 2l\dot{\phi}\dot{x} \cos \varphi.$$

Кинетическая энергия маятника:

$$T_2 = \frac{P_2}{2g} (\dot{x}^2 + l^2 \dot{\phi}^2 + 2l\dot{\phi}\dot{x} \cos \varphi).$$

Кинетическая энергия системы:

$$T = \frac{P_2}{2g} \dot{x}^2 + \frac{P_1}{2g} (\dot{x}^2 + l^2 \dot{\phi}^2 + 2l\dot{\phi}\dot{x} \cos \varphi) = \frac{P_1 + P_2}{2g} \dot{x}^2 + \frac{P_2}{2g} l^2 \dot{\phi}^2 + \frac{P_2}{g} l\dot{\phi}\dot{x} \cos \varphi. \quad (2)$$

Направляя ось ОY вертикально вниз [3], потенциальную энергию системы определим по формуле:

$$\Pi = -P_2 l \cos \varphi. \quad (3)$$

Если за нулевое положение принять нижнее положение шарика в покое, то относительно такого нулевого положения потенциальную энергию систему можно определить из выражения:

$$\Pi = P_2(l - l \cos \varphi) = P_2 l(1 - \cos \varphi).$$

Определим члены уравнений Лагранжа (1):

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} &= \frac{P_1 + P_2}{g} \dot{x} + \frac{P_2}{g} l\dot{\phi} \cos \varphi; & \frac{\partial T}{\partial x} &= 0; & \frac{\partial \Pi}{\partial x} &= 0; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= \frac{d}{dt} \left( \frac{P_1 + P_2}{g} \dot{x} + \frac{P_2}{g} l\dot{\phi} \cos \varphi \right); & \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} &= \frac{P_2}{g} l^2 \dot{\phi} + \frac{P_2}{g} l\ddot{x} \cos \varphi; \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} &= -\frac{P_2}{g} l\dot{\phi}\dot{x} \sin \varphi; & \frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\phi}} &= P_2 l \sin \varphi; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) &= \frac{P_2 l^2}{g} \ddot{\phi} + \frac{P_2}{g} l\ddot{x} \cos \varphi - \frac{P_2}{g} l\dot{x}\dot{\phi} \sin \varphi. \end{aligned}$$

Подставляя эти величины в уравнения (1), получим дифференциальные уравнения движения системы:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{P_1 + P_2}{g} \dot{x} + \frac{P_2}{g} l\dot{\phi} \cos \varphi \right) &= 0; \\ \frac{P_2}{g} l^2 \ddot{\phi} + \frac{P_2}{g} l\ddot{x} \cos \varphi - \frac{P_2}{g} l\dot{x}\dot{\phi} \sin \varphi + \frac{P_2}{g} l\dot{x}\dot{\phi} \sin \varphi + P_2 l \sin \varphi &= 0, \end{aligned}$$

или

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{P_1 + P_2}{g} \dot{x} + \frac{P_2}{g} l\dot{\phi} \cos \varphi \right) = 0; \quad \frac{P_2}{g} l\ddot{x} \cos \varphi + \frac{P_2}{g} l^2 \ddot{\phi} + P_2 l \sin \varphi = 0. \quad (4)$$

Для определения малых колебаний эллиптического маятника в уравнениях (4) положим, что  $\cos\varphi \approx 1$ ,  $\sin\varphi \approx \varphi$ . Тогда эти уравнения примут вид:

$$\frac{P_1 + P_2}{g} \ddot{x} + \frac{P_2}{g} l \ddot{\varphi} = 0; \quad \frac{P_2}{g} l \ddot{x} + \frac{P_2}{g} l^2 \ddot{\varphi} + P_2 l \varphi = 0. \quad (5)$$

В общем случае дифференциальные уравнения малых колебаний системы с двумя степенями свободы имеют вид:

$$a_{11} \ddot{q}_1 + a_{12} \ddot{q}_2 + c_{11} q_1 + c_{12} q_2 = 0; \quad a_{21} \ddot{q}_1 + a_{22} \ddot{q}_2 + c_{21} q_1 + c_{22} q_2 = 0, \quad (6)$$

где инерционные коэффициенты  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$  и квазиупругие коэффициенты  $c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}$  являются постоянными величинами.

Уравнение частот имеет вид:

$$(c_{11} - a_{11} k^2)(c_{22} - a_{22} k^2) - (c_{12} - a_{12} k^2)^2 = 0. \quad (7)$$

Из уравнений (5) определяются коэффициенты, входящие в равенства (6) и (7), которые имеют вид:

$$a_{11} = \frac{P_1 + P_2}{g}; \quad a_{12} = a_{21} = \frac{P_2}{g} l; \quad a_{22} = \frac{P_2}{g} l^2; \quad c_{11} = 0; \quad c_{12} = c_{21} = 0; \quad c_{22} = P_2 l.$$

Подставляя инерционные и квазиупругие коэффициенты в уравнение (7), определим величину  $k^2$  из выражения:

$$-\frac{P_1 + P_2}{g} k^2 \left( P_2 l - \frac{P_2 l^2}{g} k^2 \right) - \left( \frac{P_2 l}{g} \right)^2 k^4 = 0,$$

откуда из уравнения частот получим:

$$k^2 = \frac{(P_1 + P_2)g}{P_1 l}. \quad (8)$$

Для определения частоты  $k^2$  из дифференциальных уравнений движения системы (4) представим систему уравнений (5) в виде:

$$\ddot{x} = -\frac{P_2 l}{P_1 + P_2} \ddot{\varphi}; \quad (9)$$

$$\ddot{x} + l \ddot{\varphi} + g \varphi = 0. \quad (10)$$

Подставляя значение  $\ddot{x}$  в уравнение (10), получим:

$$\frac{P_1 l}{P_1 + P_2} \ddot{\varphi} + g \varphi = 0,$$

или

$$\ddot{\varphi} + k^2 \varphi = 0, \quad (11)$$

где

$$k^2 = \frac{(P_1 + P_2)g}{P_1 l}. \quad (12)$$

Значение  $k^2$  соответствует значению (8), полученному с помощью уравнения частот.

Общее решение дифференциального уравнения (11) имеет вид:

$$\varphi = C_1 \cos kt + C_2 \sin kt. \quad (13)$$

Уравнение, определяющее угловую скорость, имеет вид:

$$\dot{\varphi} = -C_1 k \sin kt + C_2 k \cos kt. \quad (14)$$

Подставляя начальные условия, при  $t_0 = 0$ ,  $\varphi_0 = 0$ ,  $\dot{\varphi}_0 = \omega_0$ , в уравнения (13) и (14), получим значения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ :

$$C_1 = 0, \quad C_2 = \frac{\omega_0}{k} = \omega_0 \sqrt{\frac{P_l}{(P_1 + P_2)g}}.$$

С учетом  $C_1$  и  $C_2$ , уравнение малых колебаний маятника будет иметь вид:

$$\varphi = \frac{\omega_0}{k} \sin kt \quad (15)$$

или, учитывая формулу (12), равенство (15) можно представить в виде:

$$\varphi = \omega_0 \sqrt{\frac{P_l}{(P_1 + P_2)g}} \sin \sqrt{\frac{(P_1 + P_2)g}{P_l}} t. \quad (16)$$

Продифференцировав дважды уравнение (15), получим:

$$\ddot{\varphi} = -\omega_0 k \sin kt.$$

Тогда уравнение (9) примет вид:

$$\ddot{x} = \frac{P_2 l \omega_0}{P_1 + P_2} k \sin kt. \quad (17)$$

Для ползуна принимаем, что при  $t_0 = 0$ ,  $x = x_0$ ,  $v = v_0$ . Проинтегрировав дважды уравнение (17), определим уравнение движения ползуна в виде:

$$x = x_0 + \frac{P_2 l}{P_1 + P_2} \omega_0 t - \frac{P_2 l \omega_0}{(P_1 + P_2)k} \sin kt$$

или

$$x = x_0 + \frac{P_2 l \omega_0}{P_1 + P_2} \left( t - \sqrt{\frac{P_l}{(P_1 + P_2)g}} \sin \sqrt{\frac{(P_1 + P_2)g}{P_l}} t \right). \quad (18)$$

## Выводы

Проанализированы аналитические методы расчета малых колебаний маятника. Предложен расчет уравнения малых колебаний с учетом сил тяжести и заданной начальной угловой скорости движения маятника. Для расчета частоты колебаний использованы инерционные и квазиупругие коэффициенты дифференциальных уравнений малых колебаний системы с двумя степенями свободы. Получены уравнения свободных колебаний маятника и закон движения ползуна в зависимости от времени и заданной начальной угловой скорости вращения маятника.

---

### Список использованных источников

1. Яблонский, А.А. Курс теоретической механики: в 2 т. / А.А. Яблонский. – М.: Высшая школа, 1971. – Т. 2: Динамика. – 488 с.
  2. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики: учебник для вузов / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – СПб.: Лань, 2006. – 736 с.
  3. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. – М.: Высшая школа, 2003. – 416 с.
  4. Локтионов, А.В. Расчет уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника с заданной начальной угловой скоростью его движения / А.В. Локтионов, С.А. Сеньков // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-тех. журнал. – 2011. – № 26. – С. 138-143.
  5. Локтионов, А.В. Расчет уравнения малых колебаний при сложном движении эллиптического маятника / А.В. Локтионов // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-тех. сборник. – Минск, 2014. – № 29. – С. 290-293.
  6. Локтионов, А.В. Кинетостатический метод расчета уравнения движения малых колебаний эллиптического маятника / А.В. Локтионов // Теоретическая и прикладная механика: междунар. науч.-тех. журнал. – Минск, 2015. – № 30. – С. 226-229.
  7. Москалев, С.А. Методы расчета малых колебаний эллиптического маятника / С.А. Москалев, А.В. Локтионов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 2013 / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Бел.-Рос. ун-т. – Могилев, 2013. – С. 40.
  8. Локтионов, А.В. Решение уравнения малых колебаний эллиптического маятника / А.В. Локтионов // Механика. Исследования и инновации: междунар. сб. науч. тр. Вып. 10. – Гомель, 2017. – С. 224-227.
  9. Локтионов, А.В. Аналитические методы расчета малых колебаний маятника / А.В. Локтионов, С.В. Рубик // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. XI Междунар. науч. техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П.О. Сухому). – Гомель: ГГТУ, 2016. – С. 215.
  10. Пановко, Я.Г. Введение в теорию колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1980. – 272 с.
- 

**Loktionov A.V.**

**Calculation of the equation of small oscillations with allowance for the gravity forces and a given initial angular velocity of the pendulum motion**

*The article considers calculation of the equations of small oscillations of the pendulum with allowance for the gravity forces of the slider and the ball. Inertial and quasi-elastic coefficients of the differential equations of small oscillations of a system with two degrees of freedom are used to calculate the frequency. Equations of free oscillations of the pendulum and the law of motion of the slider are obtained as a function of time and a given initial angular velocity of rotation of the pendulum.*

*Keywords: calculation, differential equations, small oscillations, frequency, pendulum, law of motion, slider.*

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

УДК 678.632:661.683

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОЛИАМИДА 6  
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МЕТАЛЛОФЕНОЛОСИЛИКАТОМ**

Шаповалов В.М. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларусь», г. Гомель, Беларусь), Злотников И.И. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь)

*Исследовано влияние высокодисперсного микроструктурированного металлофенолосиликатного наполнителя на эксплуатационные, в первую очередь, механические свойства полиамида 6. Исследована структура полученных композитов. Установлено, что введение металлофенолосиликата в полимерную матрицу позволяет не только повышать механическую прочность получаемых композиционных материалов, но и увеличивать их стойкость к термоокислительной деструкции и влагостойкость, что значительно расширяет сферу применения полимерных композитов.*

**Ключевые слова:** *полиамиды, органоминеральные наполнители, полимерные композиционные материалы, термодеструкция.*

**Введение**

Полиамиды относятся к полимерам, наиболее широко применяемым в машиностроении в качестве конструкционного материала, вытесняя цветные металлы, чугун и сталь, а так же в малонагруженных деталях, подверженных абразивному износу и действию агрессивных сред (подшипники скольжения, зубчатые колеса, втулки, шайбы, детали насосов и муфт сцепления). В паре с металлами они имеют низкий коэффициент трения и не схватываются с ними. В вязкотекучем состоянии полиамиды легко перерабатываются в изделия всеми известными способами: отливкой в формы, литьем под давлением, центробежным литьем и прессованием, экструзией. Часто полиамиды используют для изготовления покрытий на металлические поверхности, придающих им антифрикционные и защитные свойства, а также износостойкость [1, 2].

Недостатками полиамидов, как и многих других полимеров, являются низкая твердость и теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения и значительная усадка при формировании изделий, старение на свету, слабые диэлектрические свойства. Специфическим недостатком полиамидов является значительное водопоглощение, что приводит к набуханию изделий, отслаиванию покрытий от подложки и потере механической прочности. Это препятствует широкому применению полиамидов в механизмах, работающих в условиях повышенной влажности, в частности, в шахтных и горных машинах. Свойства полиамидов могут быть многократно улучшены использованием высокодисперсных минеральных наполнителей, что является традиционным эффективным способом направленного управления свойствами полимеров. [3]. Особенный интерес представляют силикатные и силикатполимерные наполнители в высокодисперсном состоянии, так как наполнение полимеров такими порошками, даже при их низком содержании, позволяет получать композиционные материалы с уникальны-

ми свойствами, достичь которых при наполнении порошками грубого размола практически невозможно [4, 5].

В связи с этим, целью данных исследований явилось изучение влияния полученного по лабораторной технологии высокодисперсного органосиликатного (металлофенолосиликатного) наполнителя на механическую прочность, водопоглощение и термостойкость полиамида 6 (ПА6).

### Объекты и методы исследования

В качестве полиамида использовали ПА6 марки 210/310. При изготовлении металлофенолосиликатного наполнителя (МФСН) в качестве исходных компонентов использовали стандартное натриевое жидкое стекло (ЖС) марки А по ГОСТ 13078-81 и водорастворимую фенолоформальдегидную смолу (ФФС) марки СФЖ-3027Б с массовой долей нелетучих веществ 49 % и плотностью 1,16 г/см<sup>3</sup>, для стабилизации бинарных растворов ЖС и смолы применяли гидроксид натрия.

Непосредственное совмещение растворов ФФС и ЖС приводит с течением времени к взаимной коагуляции компонентов. При этом обнаружено, что чем выше силикатный модуль стекла и концентрации растворов, тем коагуляция происходит быстрее, а время стабильности системы сокращается. Основной причиной коагуляции ЖС является действие на него свободного фенола, присутствующего в смоле в количестве до 7 мас. %. При совмещении истинного раствора ФФС с коллоидным раствором ЖС образуется многокомпонентная высокомолекулярная система с признаками полизэлектролита. Элементами коагуляционных структур в полученной системе являются мицеллы кремниевой кислоты и макромолекулы ФФС. Образование ассоциатов и межассоциатные взаимодействия осуществляются за счет активных функциональных групп (фенольные и метилольные группы смолы и сианольные группы кремниевой кислоты), а также посредством образования водородных связей. Предотвратить это явление можно путем защиты гидроксильных групп ФФС до ее введения в раствор силиката. Наиболее простым путем блокирования ОН-групп ФФС и одновременно свободного фенола является обработка смолы щелочью. Благодаря взаимодействию щелочи с гидроксильными группами фенола, образуется фенолят натрия, не вызывающий коагуляции ЖС, а частичная замена водородного иона в молекулах смолы на ион  $\text{Na}^+$  улучшает ее растворимость.

При синтезе МФСН для улучшения совместимости компонентов ЖС предварительно разбавляли водой в соотношении 1:1. Полученный бинарный органно-неорганический раствор коагулировали водным раствором хлорида железа ( $\text{FeCl}_3$ ). После завершения процесса золь-гель перехода, полученный продукт выдерживали для созревания, а образовавшийся осадок промывали, сушили путем нагрева токами СВЧ, диспергировали и отсеивали фракцию с размером частиц не более 40 мкм. Полученный порошок повторно измельчали в планетарной мельнице «Пульверизэтте-5». Как показали микроскопические исследования, частицы готового МФСН имеют неправильную форму с большой контактной поверхностью; основной размер частиц лежит в пределах 120-180 нм. Физико-химический анализ полученного нерастворимого в воде продукта показал, что его можно рассматривать как органосиликатный аддукт, в котором присутствуют микрокластеры аморфного  $\text{SiO}_2$  (около 48 мас. %), фенолоформальдегидного олигомера ROH, в том числе и в фенолятной форме RONa, (всего около 45 мас. %), в котором в результате катионного обмена часть ионов  $\text{Na}^+$  замещается ионами  $\text{Fe}^{3+}$ , что может приводить к образованию ионной связи между силикатной и органической фазой МФСН. Наличие химического взаимодействия между компонентами подтверждается

ется данными ИК-спектроскопии (спектрофотометр с Фурье преобразованием фирмы Intertech Trading Corporation). Так, например, в ИК-спектре МФСН полностью отсутствует полоса поглощения с максимумом при  $1370 \text{ см}^{-1}$ , обусловленная колебаниями фенольных гидроксильных групп, и полоса с максимумом около  $1000 \text{ см}^{-1}$ , связанная с колебаниями С-О связи метилольных групп. Также значительно уменьшается интенсивность полосы поглощения  $1240 \text{ см}^{-1}$  (колебания С-О связи фенольных групп). Кроме того широкая и интенсивная полоса в области  $980\text{-}1100 \text{ см}^{-1}$  в ИК-спектре ЖС смещается в область  $1080\text{-}1180 \text{ см}^{-1}$ . Все эти изменения можно объяснить образованием новых химических связей Si-O-C и Si-C [6-8].

Полученные высокодисперсные порошки вводили в порошок ПА6, полученный криогенным измельчением стандартных гранул ПА6, и тщательно перемешивали. Для сравнения использовали образцы ПА6, наполненные стандартным диоксидом кремния – белой сажей марки БС-30. Образцы на основе ПА6 в виде ленты получали методом экструзии на одношнековом экструдзиографе «Reochord 90» фирмы «HAAKE» (Германия) при температуре по зонам: I –  $220 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , II –  $250 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , III –  $260 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , IV –  $270 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определение разрушающего напряжения при растяжении проводили на комплексе «INSTRON» по стандартной методике. Термические явления в полимерах при нагревании исследовали методами дифференциально-термического (ДТА) и термогравиметрического (ТГА) анализов на дериватографе Q-1500D. Величину энергии активации процесса термоокислительной деструкции полимеров определяли по тангенсу угла наклона линейных участков зависимости величины двойного логарифма потерь массы образца от обратной температуры при динамическом термогравиметрическом анализе в воздушной среде [9].

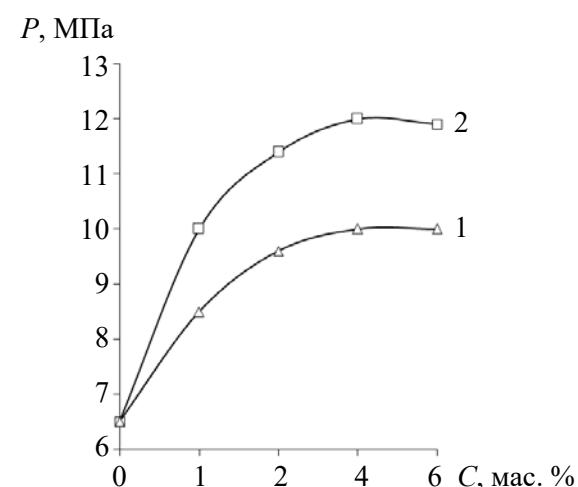
### Результаты экспериментов и их обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты определения разрушающего напряжения при растяжении ПА6 в зависимости от процентного содержания наполнителей в полимере. Как следует из приведенных данных, максимум механической прочности полимерного композита достигается при содержании исследуемых наполнителей в пределах

4-6 мас. %. Причем при модификации МФСН повышение прочности более выражено и носит экстремальный характер с максимумом при наполнении около 4 мас. %.

Для определения влияния модификации ПА6 МФСН на его водопоглощение была изучена кинетика набухания образцов композиционных материалов в воде. Величину равновесной степени набухания  $Q$  определяли на ленточных образцах толщиной около 1 мм гравиметрическим методом по формуле:  $Q = (m - m_0)/m \times 100 \text{ }%$ , где  $m$  – масса набухшего образца,  $m_0$  – масса исходного образца.

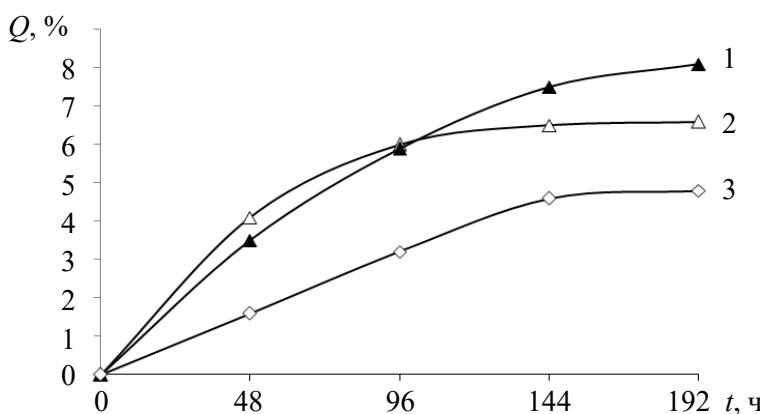
На рисунке 2 приведены результаты определения кинетики поглощения дистиллированной воды образцами при температуре  $20 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



1 – диоксид кремния БС-30; 2 – МФСН

**Рисунок 1.** – Зависимость разрушающего

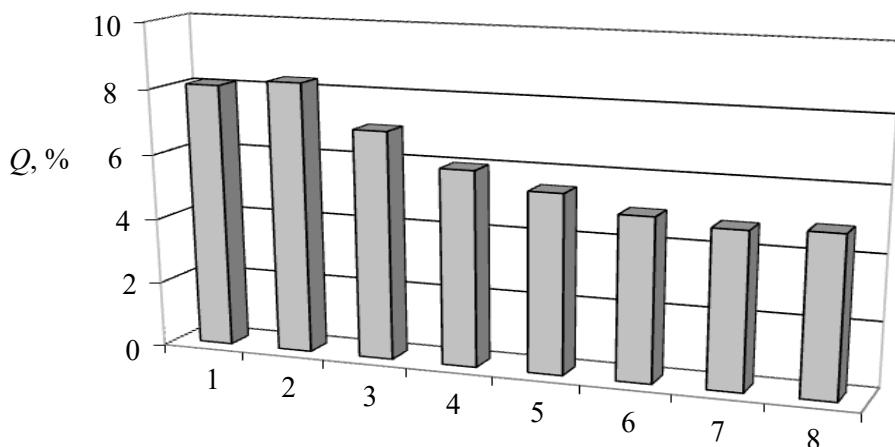
напряжения  $P$  при растяжении ПА6  
от содержания  $C$  модификаторов



1 – ПА6 исходный; 2 – ПА6 + 1 мас. % МФСН;  
3 – ПА6 + 5 мас. % МФСН

Рисунок 2. – Кинетика набухания ПА6  
в дистиллированной воде

чиваются. Это можно объяснить тем, что при малом наполнении полиамидная матрица разрыхляется независимо от природы наполнителя [10], и появление новых химических связей между матрицей и наполнителем не устраняет отрицательного эффекта разрыхления. С ростом концентрации модификатора возрастает число химических связей между поверхностью модификатора и матрицей, что и снижает водопоглощение. При дальнейшем увеличении концентрации частицы модификатора начинают образовывать сплошные цепочечные структуры внутри полимерной матрицы, что приводит как к снижению прочности композита, так и к увеличению водопоглощения, так как модификатор является гидрофильным.



1 – ПА6 исходный; 2 – 0,5 мас. %; 3 – 1 мас. %; 4 – 2 мас. %; 5 – 3 мас. %;  
6 – 4 мас. %; 7 – 5 мас. %; 8 – 6 мас. %

Рисунок 3. – Зависимость набухания ПА6 в дистиллированной воде  
от процентного содержания МФСН

Возможность образования межмолекулярных связей между поверхностью наполнителя и полиамидной матрицей была подтверждена результатами ИК-спектроскопии. Обнаружено, что в ПА6 после модификации 5 мас. % МФСН, во-первых, изменяется соотношение интенсивностей полос поглощения с максимумами при  $1650 \text{ cm}^{-1}$  (амид I) и  $1550 \text{ cm}^{-1}$  (амид II), а во-вторых, уменьшается интенсивность

Как видно из рисунка 2, максимальная (равновесная) степень набухания достигается у всех образцов только к исходу 6 суток после погружения образцов в воду. Были проведены более подробные исследования зависимости равновесной степени набухания образцов от содержания МФСН (рисунок 3).

Как показывают результаты экспериментов, приведенные на рисунках 2 и 3, при малой степени наполнения (0,5 мас. %) водопоглощение ПА6 несколько увели-

полос при  $890\text{ см}^{-1}$  (концевые  $\text{NH}_2$ -группы) и  $3300\text{ см}^{-1}$  ( $\text{NH}$ -группа). Кроме того, в ИК-спектре композиции появляются широкие новые полосы поглощения в области  $2800\text{-}3000\text{ см}^{-1}$ , которые могут быть объяснены образованием водородных связей между гидроксильными группами МФСН и акцепторными группами макромолекул ПА6. При взаимодействии амидных групп ПА6 с  $\text{OH}$ -группами МФСН возможно образование химических связей типа  $\text{Si-O-C}$ , а при взаимодействии концевых групп макромолекул ПА6 образуются связи  $\text{Si-N-C}$  [6-8].

Было исследовано влияние МФСН на стойкость ПА6 к воздействию высоких температур, результаты представлены в таблице.

Таблица. – Влияние модифицирования на термические свойства ПА6

| Характеристика   | ПА6 | ПА6 + 5 мас. % МФСН | ПА6 + 5 мас. % $\text{SiO}_2$ |
|--|-----|---------------------|-------------------------------|
| Температура начала плавления, $^{\circ}\text{C}$                   | 218 | 228                 | 225                           |
| Энталпия плавления, $\text{kДж/кг}$                                | 205 | 223                 | 221                           |
| Температура начала потери массы, $^{\circ}\text{C}$                | 359 | 378                 | 364                           |
| Энергия активации термоокислительной деструкции, $\text{kДж/моль}$ | 118 | 105                 | 97                            |

Повышение температуры плавления и энталпии плавления ПА6 при введении обоих наполнителей объясняется увеличением степени кристалличности полимера, так как мелкодисперсные частицы наполнителя играют роль центров кристаллизации.

Повышение термостойкости (температуры начала интенсивной потери массы) ПА6, модифицированного МФСН, объясняется химическим взаимодействием частиц наполнителя с полимерной матрицей. Сшитая поперечными химическими связями полиамидная матрица обладает термостойкостью на  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  больше, чем чистый ПА6. В то же время чистый диоксид кремния практически не повышает термостойкость ПА6 из-за его крайне слабого хемосорбционного взаимодействия с полимером.

Как следует из таблицы энергия активации термоокислительной деструкции ПА6 уменьшается при введении обоих наполнителей, причем для чистого диоксида кремния это уменьшение выражено более заметно. Уменьшение энергии активации термоокислительной деструкции ПА6 можно объяснить следующим образом. Для протекания термоокисления необходима непрерывная диффузия кислорода в полимер. Введение в ПА6 высокодисперсных наполнителей, обладающих большой удельной поверхностью, приводит, как отмечалось выше, к некоторому разрыхлению полимера. Это облегчает диффузию кислорода в объем полимера и интенсифицирует его термоокисление, что особенно заметно для чистого диоксида кремния, который не образует химических связей с полимером. Поэтому модифицирование ПА6 МФСН заметно увеличивает его стойкость к кратковременному воздействию высоких температур, но при длительном воздействии температуры термодеструкционные процессы в наполненном полимере могут приводить к более глубоким и необратимым изменениям. Эти особенности необходимо учитывать при разработке новых композиционных материалов на основе ПА6, модифицированного МФСН.

### Заключение

Таким образом, коагуляция катионами железа бинарного раствора ФФС + ЖС приводит к образованию многокомпонентной органоминеральной системы – металлофеноллосиликата железа, содержащего связи  $\text{Si-O-C}$ ,  $\text{Si-C}$  и  $\text{Si-O-Fe}$ . Полученный продукт обладает высокой реакционной способностью и может успешно использоваться в

качестве высокодисперсного модификатора полимерных материалов, в частности ПА6. Введение МФСН в полимерную матрицу позволяет увеличивать механическую прочность, термостойкость и значительно снижать водопоглощение. Это позволяет расширять эксплуатационные возможности ПА6 и применять его для разработки деталей механизмов, работающих в условиях повышенной влажности, в частности, в шахтных и горных машинах.

### **Список использованных источников**

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / Под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2014. – 592 с.
2. Карсакова, Е.В. Свойства и области применения полиамидов различных типов / Е.В. Карсакова, Т.П. Кравченко // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 22, № 5. – С. 10-13.
3. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Под ред. Г.С. Каца и Д.В. Милевски. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
4. Гаришин, О.К. Исследование упругопластических свойств полимер-силикатных нанокомпозитов с учетом изменения их объема при деформировании / О.К. Гаришин, В.А. Герасин, М.А. Гусева // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2011. – Т. 53, № 12 – С. 2106-2118.
5. Шаповалов, В.М. Триботехнические и механические свойства полиамида 6, модифицированногоnanoструктурными металлоэпоксисиликатами / В.М. Шаповалов, И.И. Злотников, В.В. Тимошенко // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 5. – С. 506-510.
6. Таракевич, Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы / Б.Н. Таракевич. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 54 с.
7. Купцов, А.Х. Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров: справочник / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.: Физматлит, 2001. – 656 с.
8. Инфракрасные спектры щелочных силикатов / Под ред. А.Г. Власова и В.А. Флоринской. – Л.: Химия, 1970. – 344 с.
9. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0-2002. – Введ. 28.06.07. – Минск: Минстройархитектуры, 2002. – 11 с.
10. Физика композиционных материалов: в 2 т. / Н.Н. Трофимов [и др.]. – М.: Мир, 2005. – 456 с.

---

**Shapovalov V.M., Zlotnikov I.I.**

### **Increase of operational properties of polyamide 6 modification metallophthalocyanines**

*The influence of highly dispersed microstructured metal-phenolic silicate filler on the operational, primarily mechanical properties of polyamide 6 is investigated. The structure of the obtained composites is studied. It is established that the introduction of metallophthalocyanine in the polymer matrix not only improves the mechanical strength of the obtained composite materials, but also increase their resistance to oxidative degradation and moisture resistance, which significantly expands the scope of polymer composites.*

**Keywords:** polyamides, organomineral fillers, polymer composite materials, mechanical properties, heat resistance.

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

УДК 678.743.41.01(045)(476)

## СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ФТОРКОМПОЗИТОВ

Авдейчик С.В., Сорокин В.Г., Антонов А.С., Кравченко В.И. (УО «Гродненский государственный университет имени Я. Купалы», г. Гродно, Беларусь)

*Рассмотрены структурно-технологические аспекты технологии композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Показано, что вследствие проявления инертности компонентов в процессах межфазного взаимодействия с увеличением степени наполнения в рамках традиционной технологической парадигмы реализуется структурный парадокс, проявляющийся в пропорциональном снижении параметра прочности при растяжении с увеличением степени наполнения. Предложены технологические принципы устранения негативного влияния структурного парадокса путем управления структурой фторкомпозитов на различных уровнях организации – молекулярном, надмолекулярном, фазовом и межфазовом. Разработаны эффективные приемы изготовления изделий из высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих 25-35 % мас. углеродного волокна и обладающих параметрами деформационно-прочностных характеристик, в 1,5-2 раза превосходящими параметры аналогов «Флубон», «Флувис».*

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, композит, модификатор, энергетическая активность, межфазное взаимодействие.

### Введение

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композиционные материалы на его основе находят широкое применение для изготовления изделий герметизирующего, триботехнического назначения, а так же для защиты от воздействия агрессивных технологических сред и повышенных температур [1-8]. Характерные особенности строения макромолекулы ПТФЭ обуславливают параметры надмолекулярной структуры, определяющие механизмы трения, изнашивания, деформирования под действием статистических и динамических нагрузок, а также инертность в процессах взаимодействия с компонентами большинства технологических и эксплуатационных сред, в т.ч. в процессах межфазного взаимодействия с компонентами различного состава, строения, дисперсности, технологии получения, которые используют в качестве функциональных модификаторов при получении композиционных материалов для изделий различного назначения и условий эксплуатации.

Анализ литературных источников, посвященных исследованию физико-химических и технологических аспектов получения и переработки функциональных фторкомпозитов, а также применения изделий из них в различных областях техники, свидетельствует о сформировавшихся традиционных методологических подходах, основанных на классических представлениях полимерного материаловедения, физико-химии и технологии пластических масс и композиционных материалов [1-3]. Сущность этих подходов состоит в применении методов регулирования надмолекулярной структуры матричного ПТФЭ путем введения дисперсных модификаторов и фазовой структуры композита путем использования волокнистых фрагментов органических и неорганических волокон – стеклянных, оксалоновых, базальтовых, углеродных [1-3]. Известны также технологии создания изделий из ПТФЭ и фторкомпозитов, предполагающие

использование высокоэнергетических потоков, в частности  $\gamma$ -облучения, для формирования сшитой трехмерной структуры матричного полимера с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик [6]. Последнее направление, несмотря на возможность регулирования параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик в достаточно широких диапазонах, имеет ограниченное применение вследствие технологических сложностей практической реализации. Кроме того, при образовании сшитой структуры не реализуются особенности макромолекул ПТФЭ, обеспечивающие низкий коэффициент трения изделия при эксплуатации его без подвода внешней смазки.

Для наполнения материалов на основе ПТФЭ – фторкомпозитов – используют эффективные приемы управления структурными параметрами на различных уровнях [2, 6, 8], которые позволили разработать и промышленно освоить марочный ассортимент, включающий несколько десятков наименований с различными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических и теплофизических характеристик [1-4, 6-8]. При всем многообразии марок фторкомпозитов (материалы серии «Флубон», «Флувис», Ф4К20, Ф4Г10 и др.) при их получении реализован общий технологический принцип формирования и переработки в изделия, предполагающий сочетание операций смешения компонентов в заданных соотношениях, холодного прессования заготовок и их горячего спекания (монолитизации) в атмосфере воздуха по заданному температурно-временному режиму. Этот технологический принцип, близкий по сущности к используемым в технологии порошковой металлургии, в настоящее время доминирует в литературных, патентных и коммерческих источниках, став основой технологической парадигмы функциональных фторкомпозитов [1-9].

Действующая технологическая парадигма функциональных фторкомпозитов обусловила достижение определенного уровня параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, превышение которого в ее рамках не представляется возможным или сопряжено со значительными затратами материальных и энергетических ресурсов, снижающими эффективность практического применения полученных изделий [1-4, 6-9]. Неэффективность традиционных подходов в реализации технологии функциональных фторкомпозитов особенно ярко выражена при создании наполненных материалов, содержащих более 20 % мас. компонентов различного состава и дисперсности, что резко сужает диапазон их практического применения в триботехнических и герметизирующих системах, эксплуатируемых при повышенных нагрузках, скоростях и температурах. Следствием этого является недостаточный ресурс эксплуатации узлов трения специальной техники, вакуумных, криогенных установок и уплотнительных элементов компрессорной техники для получения сжатых и сжиженных газов [3, 6-8]. Между тем, анализ механизмов разрушения и изнашивания изделий из высоконаполненных материалов свидетельствует о неполной реализации потенциала как матричного полимера (ПТФЭ), так и модифицирующего компонента (как правило, высокопрочного и износостойкого).

Цель настоящей работы состояла в разработке принципов совершенствования технологии машиностроительных фторкомпозитов на базе концепции многоуровневого модифицирования.

## 1. Материалы и методы исследования

В качестве базового связующего при получении фторкомпозитов использовали промышленно выпускаемый политетрафторэтилен марок Ф-4ПН, Ф-4ПН90, Ф-4ТМ, отличающихся средним размером порошкообразной фракции (ОАО «ГалоПолимер», Рос-

сия). Для армирования матричного политетрафторэтилена использовали фрагменты углеродного волокна (УВ), полученные механическим диспергированием углеродной ленты марки ЛО-1-12Н (ОАО «СветлогорскХимволокно», Беларусь) с размером фракций не более 200 мкм. Структурное модифицирование ПТФЭ осуществляли введением в состав технического углерода (ТУ) марок П234 и П803 со средним размером единичных частиц 20 и 80 нм соответственно, также ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ), представляющего собой полимер-олигомерные продукты термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена, полученные согласно [6, 7]. В экспериментах использовали УПТФЭ, промышленно выпускаемый под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, Россия). Кроме того, в качестве модификаторов структуры ПТФЭ использовали дисперсные частицы полуфабрикатов органического и неорганического происхождения – глин, трепела, оксидов металлов, углеродных нанотрубок, ультрадисперсных продуктов детонационного синтеза УДА и УДАГ и др.

Образцы для исследований деформационно-прочностных и триботехнических характеристик разработанных фторкомпозитов изготавливали в соответствии с требованиями нормативной документации на материалы типа «Флубон» (аналог «Флувис») [8]. Определяли параметры деформационно-прочностных ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_{cyc}$ ,  $E_{cyc}$ , НВ) и триботехнических характеристик (интенсивность изнашивания  $I$ , коэффициент трения  $f$ ) по стандартным методикам или методикам, рекомендованным в нормативной документации, с применением установок МР-200, ComTen 94С, Р-0,5, ХП-250, машин трения СМЦ-2, ХТИ-72. Анализ физико-химических и структурных аспектов модифицирования ПТФЭ, технологии получения и переработки фторкомпозитов, а также особенностей эксплуатации изделий из них осуществляли на основе данных ИК-спектроскопии (Tensor-27), атомной силовой (NANOTOP-III), оптической (Micro200T-01), растровой электронной (LE01455VP) микроскопии и рентгеноструктурного анализа (ДРОН-2,0).

Образцы для исследований изготавливали по технологическим режимам, рекомендованным в [3, 9], и по оригинальным технологиям, реализующим возможность многоуровневого модифицирования. Для модификации УВ использовали короткоимпульсное лазерное излучение с длинной волны  $\lambda = 1,06$  мкм при энергии накопителя 800-900 В и числе импульсов от 1 до 10.

## 2. Результаты и обсуждение

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии функциональных фторкомпозитов [1-9], свидетельствует о том, что основными положениями традиционной технологии, составляющей парадигму, являются применение классических методов регулирования надмолекулярной структуры матричного полимера с помощью дисперсных наполнителей органической и неорганической природы и введение в ПТФЭ дисперсных фрагментов армирующих волокон при использовании операций механического смешения компонентов, холодного прессования заготовок и их монолитизации при температурах, превышающих температуру плавления кристаллической фазы связующего.

Использование различных разновидностей этой технологии, состоящих во введении высокодисперсных наполнителей (углеродсодержащих, кремнийсодержащих – УДА, УДАГ, цеолитов и т.п.), в том числе наноразмерных и механоактивированных [1, 4, 5], а также армирующих волокон (углеродных, стеклянных, базальтовых, арамидных), или их смесей [2, 3, 6, 7], при сохранении традиционной последовательности технологических операций по получению заготовок (изделий) не позволяет достичь принципиально новых эффектов повышения параметров деформационно-прочностных, теп-

лофизических и триботехнических характеристик. Применение комплексного модификатора, включающего высокодисперсную фракцию углеродсодержащего вещества (скрытокристаллического графита) в сочетании с дисперсными фрагментами углеродных армирующих волокон (УВ) [6], при традиционной технологии формирования заготовок также не позволило существенно увеличить значения параметров прочности при растяжении, ударной вязкости и износостойкости, которые определяют потенциальную возможность их применения в конструкциях машин, механизмов и технологического оборудования с повышенными требованиями к надежности и гарантитному ресурсу.

В ряде литературных источников сделано заключение о невозможности сохранения некоторых исходных параметров матричного полимера политетрафторэтилена (например  $\sigma_p$ , удельной ударной вязкости (УУВ)) и увеличения их значений при введении наполнителей любого состава и дисперсности, в том числе высокопрочных, особенно при их повышенном содержании [8]. Общепризнанным является структурный парадокс для фторкомпозитов, состоящий в значительном снижении значений ряда важнейших параметров ( $\sigma_p$ ,  $f$ , плотности) при введении высокопрочных армирующих наполнителей (например, УВ). Предложено аналитическое выражение (1), позволяющее оценить проявление структурного парадокса при создании фторкомпозитов [9]:

$$\sigma_{pk} = \sigma_{pm} - 0,5i, \quad (1)$$

где  $\sigma_{pk}$  – прочность при растяжении композита, МПа;

$\sigma_{pm}$  – прочность при растяжении матричного политетрафторэтилена, МПа;

$i$  – содержание наполнителя, % мас.

Из данного выражения следует, что введение в состав композита более 20 % мас. любого, в том числе высокопрочного, наполнителя нецелесообразно, так как наблюдается значительное снижение значений параметра  $\sigma_p$ , определяющего область применения изделий из него.

Экспериментально наблюдаемый негативный эффект снижения значений ряда важнейших параметров фторкомпозитов при введении в состав высокопрочных наполнителей не может быть объяснен с применением классических представлений о роли структуры на надмолекулярном и межфазном уровнях в реализации механизмов деформирования и разрушения изделий из них под действием эксплуатационных факторов.

Вместе с тем, для различных типов фторкомпозитов, содержащих как высокодисперсные, в том числе наноразмерные [1, 2, 5], так и волокнистые армирующие наполнители (исходные и модифицированные) [2, 3, 6, 8] и их смеси [2], реализуется эффект многократного повышения параметра износостойкости при трении изделий по металлическому контроллеру без подвода внешней смазки. Очевидно, что этот эффект является следствием проявления механизма создания частицами наполнителей любого состава, строения и дисперсности механических препятствий деформированию и перемещению локальных областей матричного связующего под действием тангенциальных напряжений и их собственной стойкости к воздействию триботехнических факторов – температурных, механических, деструкционных.

Системный анализ влияния структуры фторкомпозитов на механизмы деформирования, разрушения и изнашивания изделий из них в различных условиях нагружения и эксплуатации позволил выявить основные факторы, влияющие на проявление структурного парадокса при реализации традиционных технологий их изготовления на молекулярном, надмолекулярном, фазовом и межфазовом уровнях (рисунок 1).



**Рисунок 1. – Основные факторы, влияющие на проявление структурного парадокса при формировании фторкомпозитов согласно технологической парадигме**

Несовершенство структуры фторкомпозитов на молекулярном уровне обусловлено специфическим строением макромолекулы политетрафторэтилена, обуславливающим отсутствие вязкотекучего состояния, характерного для термопластов, определяющего способность граничного слоя матрицы к растеканию по поверхности наполнителя, и выраженной инертностью его макромолекул в процессах физико-химического взаимодействия с компонентами любого состава, строения, технологии получения.

Молекулярное строение ПТФЭ диктует необходимость применения специальных технологических приемов для формирования изделия (полуфабриката), обеспечивающих взаимодействие единичных частиц дисперсной матрицы путем взаимодиффузии макромолекул граничных слоев с образованием малодефектной структуры при температурном воздействии на спрессованный образец (монолитизации). Этот фактор обусловил необходимость применения длительной выдержки заготовки при температурах, превышающих температуру плавления кристаллической фазы 330-350 °C, для образования монолитной матрицы с минимальным количеством дефектов, надмолекулярная структура которой существенно отличается от структуры исходных частиц порошкообразного полуфабриката. Поверхностные слои дисперсных частиц, приведенные в механический контакт действием внешнего давления, при монолитизации играют роль активного зародышаобразователя, приводя к процессам перекристаллизации и образования надмолекулярной организации нового типа. Поэтому роль морфологии и разме-

ров дисперсных частиц промышленно выпускаемого ПТФЭ весьма существенна для формирования структуры матрицы с оптимальным сочетанием параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик. Учитывая, что промышленные марки ПТФЭ (Ф4, Ф4М и др.) весьма существенно различаются не только по дисперсности и морфологии единичных частиц [2, 6, 9], но и образованы макромолекулами различной массы при отсутствии в нормативной документации параметров, характеризующих молекулярно-массовое распределение и среднее значение молекулярной массы фракций с наибольшим удельным весом [2, 9], необходимо применение специальных технологических приемов для подготовки промышленно выпускаемого полуфабриката перед его переработкой.

Очевидно, что важнейшим аспектом операции подготовки является приближение массы, активности, морфологии единичных частиц матрицы и наполнителя для оптимизации значений сил межчастичного трения, оказывающих существенное влияние на кинетику процесса холодного прессования заготовки с минимальным количеством дефектов. Кроме того, необходимо обеспечить оптимальную подвижность макромолекул различной массы в граничных межчастичных слоях, сформированных в процессе холодного прессования, при спекании заготовки с целью их взаимодиффузии и образования монолитной структуры. Для реализации этого условия эффективным является введение в межчастичный граничный слой термодинамически совместимых модификаторов с регулируемыми параметрами молекулярно-массового распределения, выполняющих роль высокомолекулярного пластификатора.

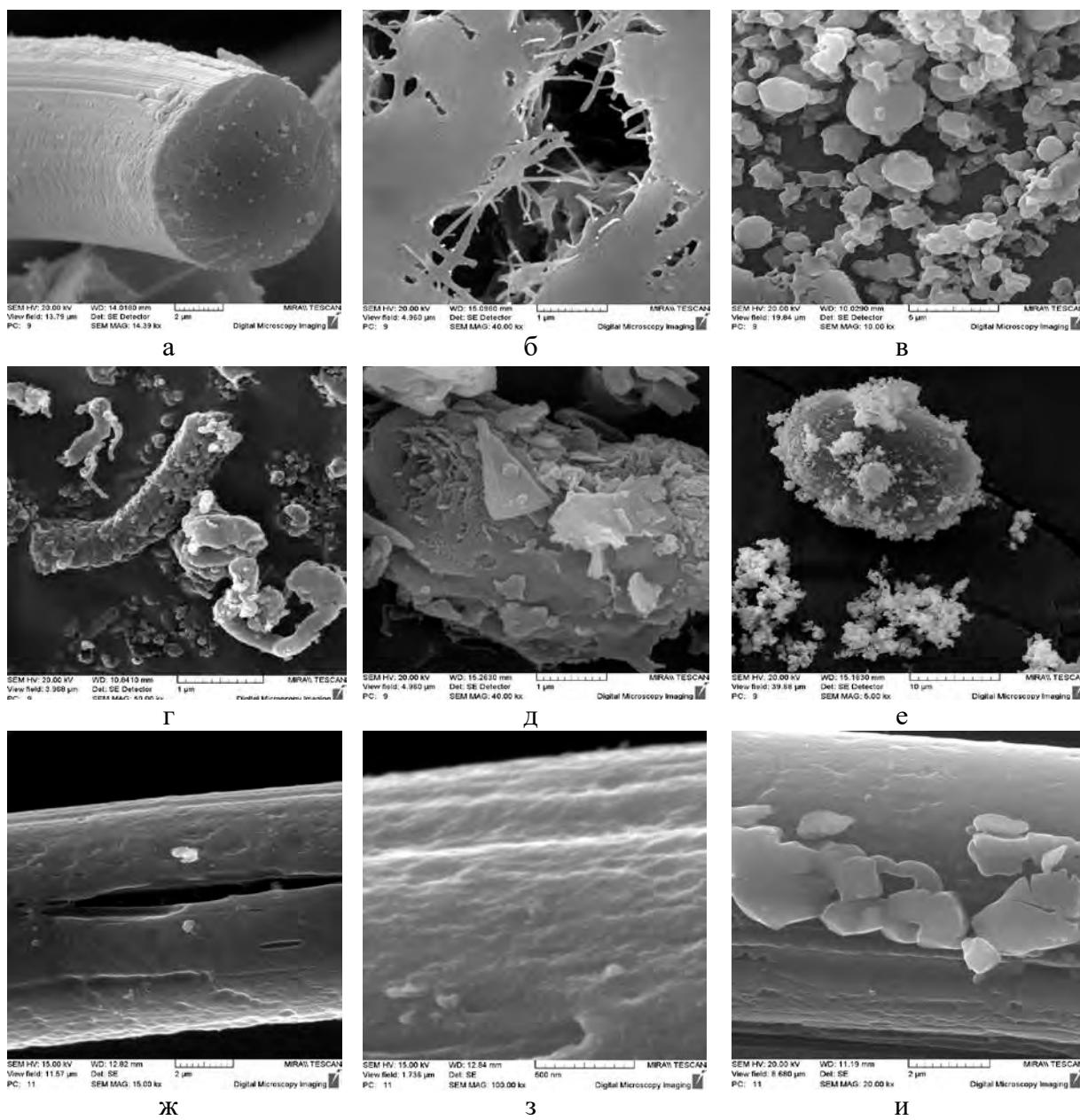
На надмолекулярном уровне формирования структуры фторкомпозита парадокс проявляется в невозможности в рамках применяемого технологического процесса одновременного получения градиентной структуры с ламеллярным строением поверхностного слоя изделия, обеспечивающим низкое сопротивление сдвигу (низкий коэффициент трения) при эксплуатации металлополимерной системы без подвода внешней смазки, и мелкосферолитным строением матрицы в объеме, обуславливающим повышенные параметры деформационно-прочностных характеристик. Процессы формирования оптимальной надмолекулярной структуры в наполненной матрице ПТФЭ при термическом воздействии в процессе монолитизации затруднены вследствие низкой подвижности макромолекул в матричном связующем. Поэтому важнейшую роль играет активность дисперсной частицы в процессах перекристаллизации исходной структуры матричных частиц ПТФЭ. В процессе смешения дисперсные частицы наполнителя сосредоточиваются в микронеровностях поверхностного слоя порошкообразных частиц связующего, которые в состоянии промышленной поставки имеют существенный разброс размерных и морфологических параметров. Это приводит к образованию на стадии холодного прессования заготовки градиента концентрации модификатора и образованию пространственной сетки, форма и размеры которой зависят преимущественно от параметров частиц полуфабриката в состоянии промышленной поставки. На стадии монолитизации заготовки (горячего спекания) дисперсные частицы модификатора способствуют перекристаллизации матричного связующего с образованием надмолекулярной структуры нового типа, размеры и морфологические особенности которой зависят от активности частицы, величины ее энергетического поля, его влияния на подвижность макромолекул, расположенных в периферии, и способность их к пространственной ориентации с образованием упорядоченных областей [1]. Вследствие этого фактора для оптимизации структуры фторкомпозита на надмолекулярном уровне достаточно допингового [1, 3] содержания дисперсных компонентов с достаточной активностью, находящегося в диапазоне значений 0,001-1,0 % мас. [1, 3, 6]. При превышении содержания дисперсного компонента в композите образуются кластерные структуры, пре-

пятствующие процессам перекристаллизации матричного связующего с образованием оптимальной надмолекулярной структуры и вызывающие изнашивание сопряженного металлического контртела или разрушение изделия при воздействии внешней нагрузки. С повышением активности единичных частиц дисперсных модификаторов, которая может быть достигнута путем применения специальных технологий образования наноразмерных фракций [1, 6], механическим или термическим воздействием на полупроизводитель [1, 2, 4], эффективность их действия на процесс надмолекулярной организации увеличивается, что обеспечивает необходимый эффект модифицирования при существенно меньших концентрациях [1, 7]. Поэтому наноразмерные модификаторы (УДАГ, цеолиты, сиалоны и др.), подвергнутые механоактивированию, обеспечивают выраженный эффект увеличения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик фторкомпозитов при содержании до 1 % мас. [1, 4].

На фазовом уровне образование несовершенной структуры фторкомпозита обусловлено формированием в процессе смешивания из частиц матричного полимера и наполнителя, имеющих различную форму, массу и электрофизические характеристики (рисунок 2), агломератов кластерного типа, обуславливающих возникновение микродефектов в образце после холодного прессования и сохраняющихся после спекания (монолитизации) заготовки, вследствие действия сил межчастичного трения, стericеских и реологических препятствий для заполнения полостей кластеров связующим.

Межфазовый уровень несовершенства структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, приводящего к снижению параметров служебных характеристик, реализуется вследствие дефектности граничных слоев в системе «матрица – наполнитель», обуславливающей их низкую прочность, которая предопределена инертностью макромолекул ПТФЭ в процессах адсорбционного взаимодействия и отсутствием вязкотекучего состояния связующего, препятствующего его растеканию по поверхности наполнителя и повышению вклада механической составляющей в силу адгезионного взаимодействия компонентов. Поэтому в композитах, наполненных дисперсными фрагментами углеродных, стеклянных и других волокон, не реализуются в полной мере их прочностные параметры, которые в других термопластичных матрицах, обладающих высокой текучестью расплава, приводят к существенному повышению значений параметров  $\sigma_p$  и  $\sigma_{cyc}$ . Например, параметр  $\sigma_p$  для углепластиков и стеклопластиков на основе полиамида 6 (ПА6) имеет значение от 110 до 130 МПа соответственно при содержании наполнителя 20 % мас. и исходном значении  $\sigma_p$  для матричного полимера 60÷65 МПа.

Совокупный анализ, приведенных на рисунке 1 основных факторов, приводящих к проявлению негативного эффекта снижения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик фторкомпозитов при увеличении содержания наполнителя, свидетельствует о преобладающей роли факторов, обусловленных особенностями технологии получения матричного связующего (порошкообразного ПТФЭ) и армирующего наполнителя, которые усугубляют неблагоприятное влияние характерного химического строения основных компонентов на процессы формирования оптимальной структуры на различных уровнях организации при использовании традиционных приемов смешения компонентов, холодного прессования заготовок и их горячего спекания (монолитизации). Поэтому для повышения значений параметров прочности и износстойкости композитов с содержанием наполнителя более 20 % мас., относящихся к высоконаполненным фторкомпозитам, необходимо изменить традиционные подходы технологической парадигмы, исходя из особенностей состава, строения и геометрических параметров основных компонентов, определимых технологией их получения.



**Рисунок 2. – Характерная морфология частиц углеродного волокна (а, ж, з, и), политетрафторэтилена (б), ультрадисперсного политетрафторэтилена (в), углеродных нанотрубок (д), оксидов металлов (е), исходных и после воздействия ЛИ при количестве импульсов 1 (ж, з), 5 (и) и энергией единичного импульса 530 мДж (ж, з) и 600 мДж (и).**

**Увеличение указано на снимках. Данные РЭМ**

Методом РЭМ установлено, что независимо от индивидуальных параметров состава, структуры и технологии дисперсных частиц для них характерно кластерообразование в процессе получения и хранения (рисунок 2), и наличие у частиц микроразмерного диапазона (частиц механического диспергирования силикатных стекол, формиата меди, трепела, глин, оксидов металлов, политетрафторэтилена, ультрадисперсного политетрафторэтилена) наноразмерных компонентов, которые определяют характерную морфологию поверхности слоя. Процессы кластеризации обусловлены технологией

получения частиц, условиями их хранения и подготовки к применению в качестве модификаторов полимерных матриц.

Габитус наноразмерных компонентов поверхностного слоя зависит от индивидуальных особенностей дисперсной частицы. Например, у частиц ПТФЭ проявляется вискерная форма нанокомпонентов (рисунок 2б), для углеродных трубок и оксидов металлов – глобулярная (рисунок 2г, 2е), для частиц трепела – пластиинчатая (рисунок 2д). Фрагменты углеродных волокон характеризуются глобулярными структурами, сформированными в результате воздействия повышенных температур на органический полупрофиль (рисунок 2г), приводящих к карбонизации и графитизации [3].

Проявление процесса кластеризации и особенности морфологии поверхностного слоя отдельных частиц различного состава, строения и технологии получения обуславливают необходимость использования индивидуальных приемов при получении композиционных материалов заданного функционального назначения, которые обеспечивают оптимальное модифицирующее действие на определенном уровне структурной организации.

Очевидна роль индивидуальных особенностей энергетического состояния дисперсных частиц различного состава, кристаллохимического строения и технологии получения на механизмы протекания процессов кластеризации в композиционных матрицах при используемой совокупности необходимых операций, составляющих технологический процесс – хранения, дозирования, смешивания, загрузки в рабочий объем установки и др. Поэтому целесообразно установление общих признаков, которые обуславливают эффективное модифицирующее действие дисперсных частиц, кинетику и механизмы кластерообразования на различных стадиях технологического процесса.

Рассмотрены особенности энергетического состояния дисперсных частиц модификаторов с учетом современных представлений физики конденсированного состояния и материаловедения полимерных композитов с наноразмерными компонентами (нанокомпозитов) [10-12].

Анализ особенностей морфологии поверхностного слоя частиц различных модификаторов (рисунок 2) свидетельствует о наличии характерных наноразмерных компонентов, механизмы образования которых, как правило, индивидуальны для веществ с различным составом, строением, технологической предысторией получения и диспергирования.

Согласно современным представлениям физики конденсированного состояния, квантовой физики и материаловедения изменение параметров характеристик физических свойств  $S(r)$  от размера частицы  $r$  определяется функцией:

$$S(r) = \frac{S_v}{\exp \left[ -\alpha \left( \frac{1-x}{x} \right)^{3/2} \right]}, \quad (2)$$

где  $S_v$  – объемное значение параметра;

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий вид определяемого параметра;

$x = r/L_0$ ;

$r$  – размер частицы;

$L_0$  – размерная граница между макроскопическим и наноразмерным состоянием частицы.

Параметр  $L_0$ , согласно [10], может быть рассчитан по формуле:

$$L_0 = 230 \cdot \theta_D^{-1/2}, \quad (3)$$

где  $\theta_D$  – температура Дебая для вещества частицы.

Расчет параметра  $L_0$  для исследованных частиц свидетельствует о том, что компоненты, формирующие рельеф поверхностного слоя, имеют размеры, соответствующие наносостоянию, характеризуемому особыми параметрами энергетических характеристик [10-12].

Для оценки энергетического состояния дисперсных частиц, морфология которых приведена на рисунке 2, использовали способ спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ), который согласно [13] позволяет определить температурные диапазоны проявления активности по величине термостимулированных токов.

Анализ спектров ТСТ модификаторов различного состава, строения и технологии получения (шунгит, УПТФЭ «Форум», трепел и др.) свидетельствует не только об их активном состоянии, но и о различных температурных диапазонах проявления этого состояния. Учитывая, что для исследований были выбраны дисперсные частицы преимущественно микрометровой размерности 50-200 мкм, полученные механическим диспергированием природных полуфабрикатов (шунгит, трепел, глины) и термодинамическим синтезом при абляции блока ПТФЭ (УПТФЭ «Форум»), при получении и хранении которых произошли процессы кластеризации, следует полагать, что существенное влияние на проявление энергетической активности оказывают структурные компоненты поверхностного слоя, находящиеся в наносостоянии. Поэтому для повышения эффективности модифицирующего действия дисперсных компонентов различного состава и строения целесообразно использовать технологические приемы, обуславливающие создание морфологии поверхностного слоя с наноразмерными компонентами, обеспечивающими формирование оптимальной структуры на надмолекулярном и межфазовом уровнях организации композитов.

Такая морфология будет способствовать не только процессам ориентации макромолекул связующего под действием силового поля нанокомпонентов, но образованию слоя с повышенной адгезионной прочностью вследствие заполнения неровностей рельефа связующим.

В качестве примера реализации обоснованного подхода к выбору эффективного модификатора рассмотрим вариант устранения «структурного парадокса», проявляющегося при введении в матрицу политетрафторэтилена углеродных волокон в виде дисперсных фрагментов с размерами 100-200 мкм [2, 3, 6, 8]. Морфология поверхностного слоя базового УВ характеризуется наличием глобулярных нанокомпонентов с высотными характеристиками, не превышающими 1-5 нм (рисунок 2а). Учитывая выраженную инертность УВ к процессам физической и химической адсорбции, которые бы способствовали образованию граничного слоя необходимой адгезионной прочности, а также выраженную инертность макромолекул ПТФЭ к процессам адсорбционного взаимодействия с практически любыми высокомолекулярными матрицами и отсутствие характерного вязкотекучего состояния даже при температурах, превышающих температуру плавления кристаллической фазы, объясним становятся механизм проявления неблагоприятного падения параметров прочности ПТФЭ при его модифицировании УВ во всем диапазоне концентраций 5-20 % мас. Для снижения вероятности проявления этого неблагоприятного эффекта нами предложены технология модифицирования поверхностного слоя УВ импульсным лазерным излучением (ЛИ) с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм и длительностью импульса  $2 \cdot 10^{-3}$  с, число импульсов 1÷10 в атмосфере

ре воздуха. Исследования методом РЭМ свидетельствуют о возможности существенного изменения морфологии поверхностного слоя УВ, обработанного ЛИ (рисунок 2ж, 2з, 2и). Так даже при однократном импульсе воздействия не только поверхностный слой фрагмента УВ приобретает развитый нанорельеф с размером составляющих компонентов 10-100 нм (рисунок 2ж, 2з), но и образуются объемные дефекты строения, обусловленные разрушением (перфорированием) волокна под действием процессов абляции и термического удара. При повышении интенсивности энергетического воздействия путем увеличения числа импульсов до пяти и одновременного увеличения энергии импульса до 600 мДж (рисунок 2ж) наблюдается развитие рельефа поверхностного слоя с образованием выраженных участков плавления, абляции, осаждения продуктов абляции с образованием кластерных структур и перфорирования волокна. Не рассматривая механизмы морфологических изменений фрагментов УВ, которые составляют объект отдельных исследований, отметим, что данный метод модифицирования поверхностных слоев волокнистых наполнителей имеет особую перспективу в связи с развитой инструментальной базой конструкций источников лазерного излучения, которые нашли широкое распространение в современном материаловедении. Отметим, что модификации с применением лазерного излучения могут быть подвергнуты как волокнистые полуфабрикаты, так и дисперсные фрагменты и тканевые полуфабрикаты, широко применяемые в технологии композитов.

Модельные эксперименты по оценке эффективности применения модифицированного лазерным излучением УВ (УВ ЛИ) для наполнения ПТФЭ свидетельствуют об перспективности развития данного технологического подхода. Сравнение параметров деформационно-прочностных ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_{cж}$ ,  $\sigma_{10\%}$ ) и триботехнических ( $f$ ,  $I$ ) характеристик модельного композита ПТФЭ + 20 % мас. УВ ЛИ и промышленного Флувис 20, содержащего 18,5 % мас. углеродного волокна «Вискум», полученных при идентичных технологических режимах подготовки и переработки согласно действующей нормативной документации, свидетельствует о технологически значимом 15-20 % эффекте повышения параметров  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{10\%}$  у модельного композита по сравнению с аналогом при сохранении заданного уровня параметров триботехнических характеристик. Достигнутый эффект дает основание использовать технологию лазерного модифицирования волокнистых наполнителей для получения фторкомпозитов с повышенными параметрами служебных характеристик. Данный метод активации фрагментов УВ представляется более перспективным, чем заявленный метод плазмохимической обработки в среде фторсодержащих компонентов в вакуумной камере [8], т.к. реализуется в среде воздуха и позволяет осуществлять различные виды модификации поверхностного слоя функциональными компонентами, в т.ч. фторсодержащими (олигомеры и полимер-олигомерные смеси Эпилам, Фолеокс, Форум), металлоксодержащими (формиаты, оксалаты), углеродсодержащими (минеральные и синтетические масла), кремнийсодержащими (силановые соединения) соединениями, фрагменты которых, образовавшиеся под действием высокоэнергетического потока, способны вступать во взаимодействие с активными центрами нанорельефа углеродного волокна. Управляя соотношением геометрических, энергетических и структурных параметров активного нанорельефа и аппретирующего слоя, возможно получение оптимальной структуры и энергетического состояния граничного слоя в композитах на основе ПТФЭ и повышение параметров их служебных характеристик.

## Выводы

При выборе методологического подхода к определению технологии получения композиционных материалов на основе высокомолекулярных матриц (полимерных, олигомерных, совмещенных) целесообразна реализация механизмов проявления энергетического состояния модифицирующего компонента в процессах структурообразования на межфазном уровне. Оптимальное управление параметрами энергетического состояния дисперсных частиц наполнителя обуславливает реализацию совокупного эффекта структурирования граничного слоя под действием силового поля модификатора и оптимизации адсорбционных процессов различного механизма в активном нанорельефе поверхностного слоя. Для управления параметрами энергетического состояния дисперсных частиц наполнителей целесообразно использовать технологические воздействия, учитывающие особенности состава, кристаллохимического строения, технологической предыстории. Перспективно применение технологий термической, лазерной и механохимической активации компонентов, применяемых для создания функциональных материалов на основе высокомолекулярных матриц различного вида.

## Список использованных источников

1. Охлопкова, А.А. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями / А.А. Охлопкова, О.А. Андриянова, С.Н. Попов. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. – 224 с.
2. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков [и др.]. – М.: Недра. – Бизнесцентр, 2004. – 262 с.
3. Сиренко, Г.А. Антифрикционные карбопластики / Г.А. Сиренко. – К.: Техника, 1985. – 195 с.
4. Охлопкова, А.А. Разработка полимерных нанокомпозитов триботехнического назначения / А.А. Охлопкова, П.Н. Петрова, О.В. Гоголева // Перспективные материалы. – 2008. – № 6, Ч. 2. – С. 213-217.
5. Гинзбург, Б.М. Влияние фуллереносодержащих добавок к фторопластам на их несущую способность при трении / Б.М. Гинзбург, Д.Т. Точильников // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, Вып. 2. – С. 120-124.
6. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение: монография / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2012. – 319 с.
7. Фторсодержащие ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Струка. – Минск: Тэхналогия, 2011. – 270 с.
8. Шелестова, В.А. Конструкционные материалы триботехнического назначения на основе модифицированных углеволокон и политетрафторэтилена: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.А. Шелестова; Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2002. – 22 с.
9. Пугачев, А.К. Переработка фторопластов в изделия: технология и оборудование / А.К. Пугачев, О.А. Росляков. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
10. Авдейчик, С.В. Введение в физику нанокомпозиционных машиностроительных материалов / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГТАУ, 2009. – 439 с.
11. Guozhong, Cao Nanostructures and nanomaterials / Cao Guozhong, Wang Ying. – USA World Scientific, 2011. – 581 p.
12. Гусев, А.И. Наноматериалы,nanoструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Наука, 2007. – 416 с.

13. Охлопкова, А.А. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями / А.А. Охлопкова, А.В. Виноградов, Л.С. Пинчук. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 164 с.

### **Перечень условных обозначений**

$\sigma_{pk}$  – прочность при растяжении композита;  
 $\sigma_{pm}$  – прочность при растяжении матричного политетрафторэтилена;  
 $\sigma_p$  – прочность при растяжении;  
 $\sigma_{cж}$  – прочность при сжатии;  
 $f$  – коэффициент трения;  
 $I$  – интенсивность изнашивания;  
 $E_{cж}$  – модуль упругости при сжатии;  
HB – твердость по Бринеллю.

---

**Avdeychik S.V., Sarokin V.G., Antonov A.S., Krauchanka V.I.**

### **Structural and technological aspects of fluorine composition materials technology**

*Structural and technological aspects of the technology of polytetrafluoroethylene composite materials are considered in the article. It is made clear that due to inactivity of components in the process of interfacial interaction with the increase in degree of filling in the traditional technological paradigm, structural paradox takes place as proportion reduction of tensile strength parameter with increasing degree of filling. Technological principles are proposed to eliminate the negative impact of the structural paradox by controlling the structure of fluorine composition materials at various levels – molecular, supramolecular, and interfacial phase. Efficient methods of manufacturing of products made from highly filled fluorine composites containing 25-35 % by weight of carbon fiber with parameters of strength characteristics 1,5-2 times superior to parameters of “Flubon” and “Fluvis” analogues are worked out.*

*Keywords: polytetrafluoroethylene, composite modifier, energetic activity, interfacial interaction.*

Поступила в редакцию 30.11.2017 г.

УДК 550.84:543(045)(476)

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ТВЕРДЫХ СУБСТРАТАХ

Овчинников Е.В. (УО «Гродненский государственный университет им. Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь)

*В статье приведены результаты исследований по изучению основ технологии формирования нанофазных и нанокомпозиционных фторорганических покрытий, разработка основ технологического и практического применения принципиально новых машиностроительных триботехнических покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками. Изучены закономерности формирования нанофазных и нанокомпозиционных покрытий из фторсодержащих олигомеров на металлических и неметаллических поверхностях во взаимосвязи с условиями и технологией формирования покрытий из фторсодержащих полимеров и олигомеров. Проведен анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на формирование тонкопленочных нанофазных и нанокомпозиционных покрытий, формируемых плазмохимическими и растворными методами.*

**Ключевые слова:** *фторсодержащие олигомеры, наночастицы, размерная граница, структура, квантовая теория.*

### Введение

Развитие современной науки и техники предполагает создание новых материалов на базе металлов, неметаллических соединений, полимеров, стекол и т.п., которые определяют эксплуатационный ресурс узлов трения машин и механизмов. Широкое применение в промышленности получили тонкопленочные фторсодержащие покрытия, получаемые из растворов фторсодержащих олигомеров (ФСО), известных под торговыми марками «Фолеокс» и «Эпилам». Для придания тонкопленочным покрытиям повышенных эксплуатационных характеристик применяют методы, основанные на переводе полимерных покрытий в активное состояние с последующим осаждением на поверхности твердого тела. Для этого применяют методы предварительной активации поверхности, на которую наносится покрытие, (рентгеновское, лазерное излучение, коронный и тлеющий разряд, механохимическая обработка). Возможна предварительная активация самих макромолекул путем плазмохимического инициирования и растворения олигомеров в летучих растворителях. Широко используемым методом является активация макромолекул фторсодержащего олигомера после осаждения на подложку, в результате чего макромолекулы «прививаются» к твердой поверхности, т.е. образуют прочные хемосорбционные связи между молекулой фторсодержащего олигомера и подложкой.

Тонкопленочные нанофазные покрытия, сформированные с применением вышеуказанных технологий, позволяют при сохранении их геометрических параметров в узлах трения, запорной арматуры и т.п. обеспечить увеличение их эксплуатационного ресурса.

Настоящая работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов формирования нанокомпозиционных тонкопленочных фторсодержащих покрытий, созданию новых типов тонкопленочных покрытий, разработке основ технологического и практического применения.

Особое внимание уделено влиянию нанофаз и наноструктурированных областей на формирование тонкопленочных фторорганических покрытий.

Рассмотрены вопросы трансформации структуры покрытий при влиянии различного зарядового состояния твердых поверхностей, химического состава, концентрации наномодификатора во взаимосвязи с физико-механическими характеристиками.

### Методика исследований

При проведении исследований использовали: системный анализ, ИК-спектроскопию пропускания и НПВО, ЭПР-спектроскопию, рентгеноструктурный анализ, дифференциальную термическую анализы, электронную просвечивающую и растровую, оптическую и атомно-силовую микроскопию (АСМ), методы двухлучевой интерферометрии, специальные машины трения, а также натурные установки и стенды. Численные решения систем дифференциальных уравнений и математический анализ экспериментальных данных выполнялись с помощью пакетов прикладных программ.

### Результаты исследований

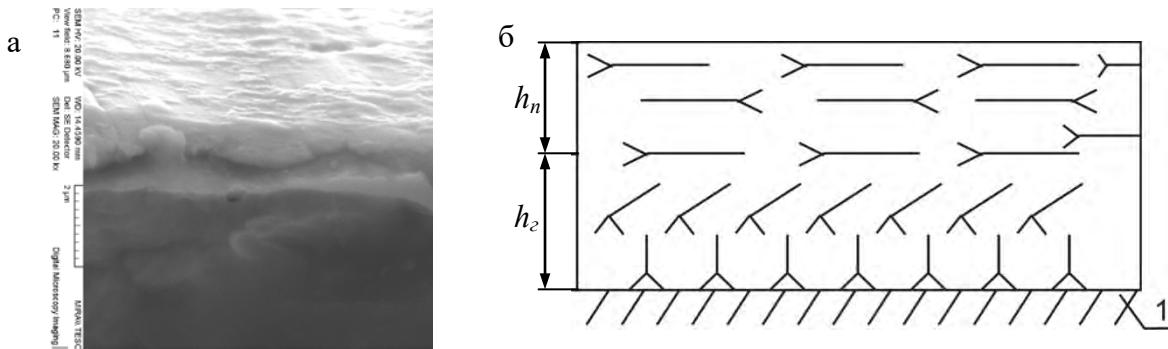
В работе [1] предложена классификация фторсодержащих покрытий в зависимости от технологии формирования, наличия модификатора, из различного состояния (рисунок 1). Однако, несмотря на достаточно полный перечень факторов, оказывающих влияние на формирование данных покрытий, на текущий момент существуют технологии, которые данная классификация не учитывает [2].



Рисунок 1. – Классификация фторсодержащих триботехнических покрытий [1]

Тонкопленочные покрытия из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» различного состава представляют собой «сэндвич»-структуры, состоящие из совокупности слоев макромолекул с различной ориентацией по отношению к подложке (рисунки 2а, 2б). Наличие в составе макромолекулы олигомера полярных групп (-OH, -COOH, -NH<sub>2</sub>)

способствует их адсорбционному взаимодействию с поверхностным слоем металлической подложки 1 (рисунок 2а) с образованием слоя с преимущественной ориентацией макромолекул перпендикулярно плоскости поверхности. В структуре пленки сочетаются слои с различным упорядочением вследствие ослабления действия силового поля поверхности металлической подложки. Толщина граничного слоя  $h_e$  и соотношение толщины упорядоченного и неупорядоченного поверхностных слоев  $h_e : h_n$  определяются строением макромолекулы (типом и количеством полярных функциональных групп) и активностью металлической подложки (строением и толщиной оксидного слоя, дефектностью, зарядовым состоянием, фазовой структурой и т.п.).



**Рисунок 2. – Морфология (а) и схема строения (б) покрытий из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из меди М0**

Такой механизм формирования фторсодержащих покрытий объясняет повышение физико-механических характеристик обрабатываемых материалов, а также соответствует высокой технологичности в применении.

Основные полосы поглощения фторсодержащих олигомеров находятся в области волновых чисел от  $700 \text{ см}^{-1}$  до  $1700 \text{ см}^{-1}$ . Полоса поглощения при  $990 \text{ см}^{-1}$  относится к поглощению  $\text{CF}_3$ -групп, полосы поглощения в области  $1130\text{--}1340 \text{ см}^{-1}$  обязаны своим происхождением колебанию связей  $\text{C}-\text{F}$  и  $\text{C}-\text{F}_2$ . В дальней области наблюдаются полосы поглощения, которые обусловлены природой концевых групп фторсодержащих олигомеров и кинетикой их взаимодействия с подложкой.

Установлена оптическая неоднородность полос поглощения с увеличением толщины слоя ФСО, что объясняется ориентационной неоднородностью фолеоксов в зависимости от толщины слоя. С увеличением толщины слоя ФСО на металлических подложках вектор момента колебательного перехода связей  $-\text{CF}$  изменяет преимущественную ориентацию с параллельной относительно подложки на перпендикулярную. Установлено влияние металлической подложки на механизм формирования тонкопленочного покрытия из фторсодержащих олигомеров. Данный эффект объясняется с позиции гетерогенного строения металлической подложки, в результате чего возникает неравновесность переноса заряда между отдельными участками поверхностного слоя и на границе раздела компонента. Исходя из положений квантовой механики, в случае рассмотрения модели свободного независимого электрона (адиабатическое приближение) и при использовании в дальнейшем барьерной модели была оценена типичная структура металлического образца. В результате получено уравнение, позволяющее оценить значение коэффициента прозрачности (коэффициента пропускания) барьера:

$$P = \frac{D}{D'} = \frac{k_1^2}{k_3^2} = \frac{E}{E - V},$$

где  $D$ ,  $\bar{D}$  – коэффициент прозрачности (коэффициент пропускания) барьера;

$k_1, k_3$  – номера зон (волновые числа), значения потенциала для 1 и 3 зоны;

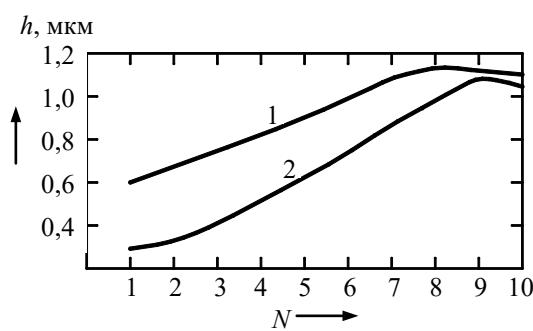
$V$  – высота потенциального барьера;

$E$  – энергия электрона [3].

Исходя из данного выражения видно, что различные степени дефектности по обе стороны от границы раздела приводят к появлению на ней электрически заряженных областей, с размерами, значительно большими атомных. Поверхностные слои поликристаллического материала остаются электронейтральными, но ее адгезионные, триботехнические, адсорбционные и др. свойства зависят от наличия зарядовой мозаики на поверхности (рисунок 3).

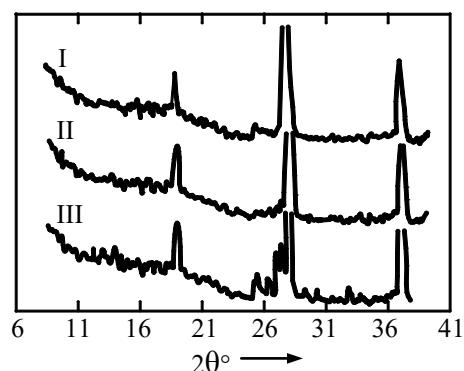
Проведены эксперименты подтверждающие влияние заряженных поверхностей на ориентацию ФСО. В качестве модельных образцов твердых тел, обладающих зарядовой мозаикой, применяли кристаллы слюды. Покрытия олигомеров формировали на поверхностях слюды в зависимости от времени расщепления. Установлено, что на поверхности слюды происходит ориентация тонких пленок ФСО под действием поверхностного заряда (рисунок 4).

Обработка поверхности слюды в первые секунды расщепления фторсодержащими олигомерами приводит к появлению хорошо выраженных рефлексов, которые находятся при следующих значениях угла дифракции:  $\Phi - 5^{\circ}4'$ ;  $6^{\circ}$ ;  $6^{\circ}3'$ ;  $12^{\circ}1'$ ;  $12^{\circ}4'$ ;  $13^{\circ}$ ;  $14^{\circ}$ ;  $14^{\circ}4'$ ;  $16^{\circ}$ ;  $\Phi 14-12^{\circ}$ ;  $12^{\circ}3'$ ;  $12^{\circ}4'$ .



1 – Ф1; 2 – Ф14

Рисунок 3. – Зависимость толщины покрытия  $h$  фторсодержащих олигомеров, сформированных на металлических подложках, от количества обработок  $N$  в растворе ФСО



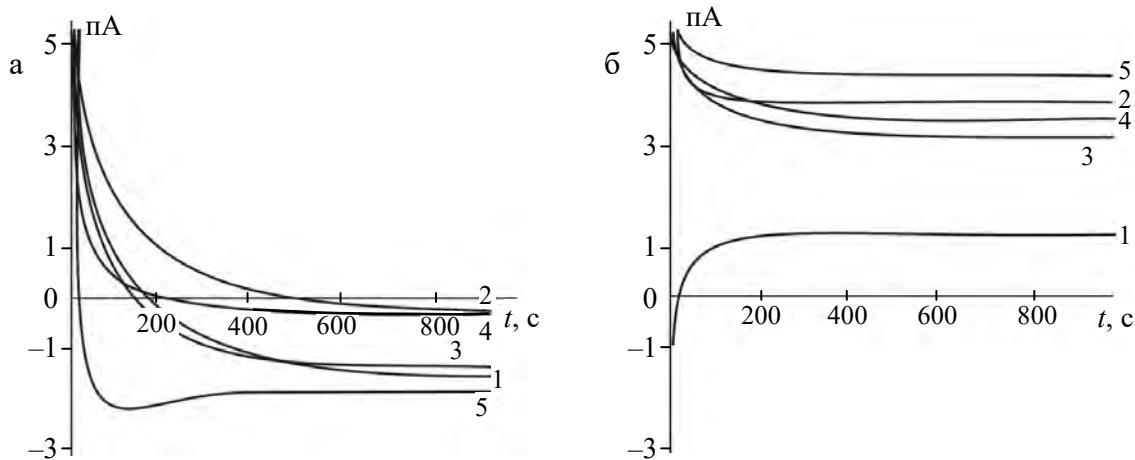
I – слюда; II – Ф1 на слюде; III – Ф1, нанесенный на слюду сразу же после ее расщепления;  $\theta$  – угол дифракции

Рисунок 4. – Рентгенограммы фторсодержащего олигомера Ф1, нанесенного на слюду

Данный эффект наблюдается и для металлических подложек. Зарядовая мозаика поверхностных слоев гетерогенных твердых тел оказывает влияние на характер зависимости значений термостимулированных токов от времени (рисунок 5).

Дополнительный механизм, объясняющий процесс ориентации ФСО на поверхности металлической подложки, заключается в том, что в процессе механической обработки физико-механические характеристики поверхностных слоев коренным образом меняются. Структура данных слоев состоит из большого числа беспорядочно расположенных и чрезвычайно мелких кристаллов, размером всего несколько элементарных ячеек. Такое строение обуславливает увеличение запаса потенциальной энергии в поверхностных слоях металла, что и приводит к ориентационным эффектам в покрытиях фторсодержащих олигомеров. Толщина формируемого покрытия зависит от типа под-

ложки и строения молекулы фторсодержащего олигомера (рисунок 3). Для большинства металлических подложек оптимальная толщина покрытия составляет величину 1-1,4 мкм. Увеличение количества обработок после достижения оптимальной толщины покрытия фторсодержащих олигомеров приводит к более развитой морфологии поверхности.



**а –  $\Phi 1$ ; б –  $\Phi 14$ ; 1 – однократная обработка в растворе ФСО; 2 – двукратная обработка в растворе ФСО; 3 – трехкратная обработка в растворе ФСО; 4 – четырехкратная обработка в растворе ФСО; 5 – пятикратная обработка в растворе ФСО**

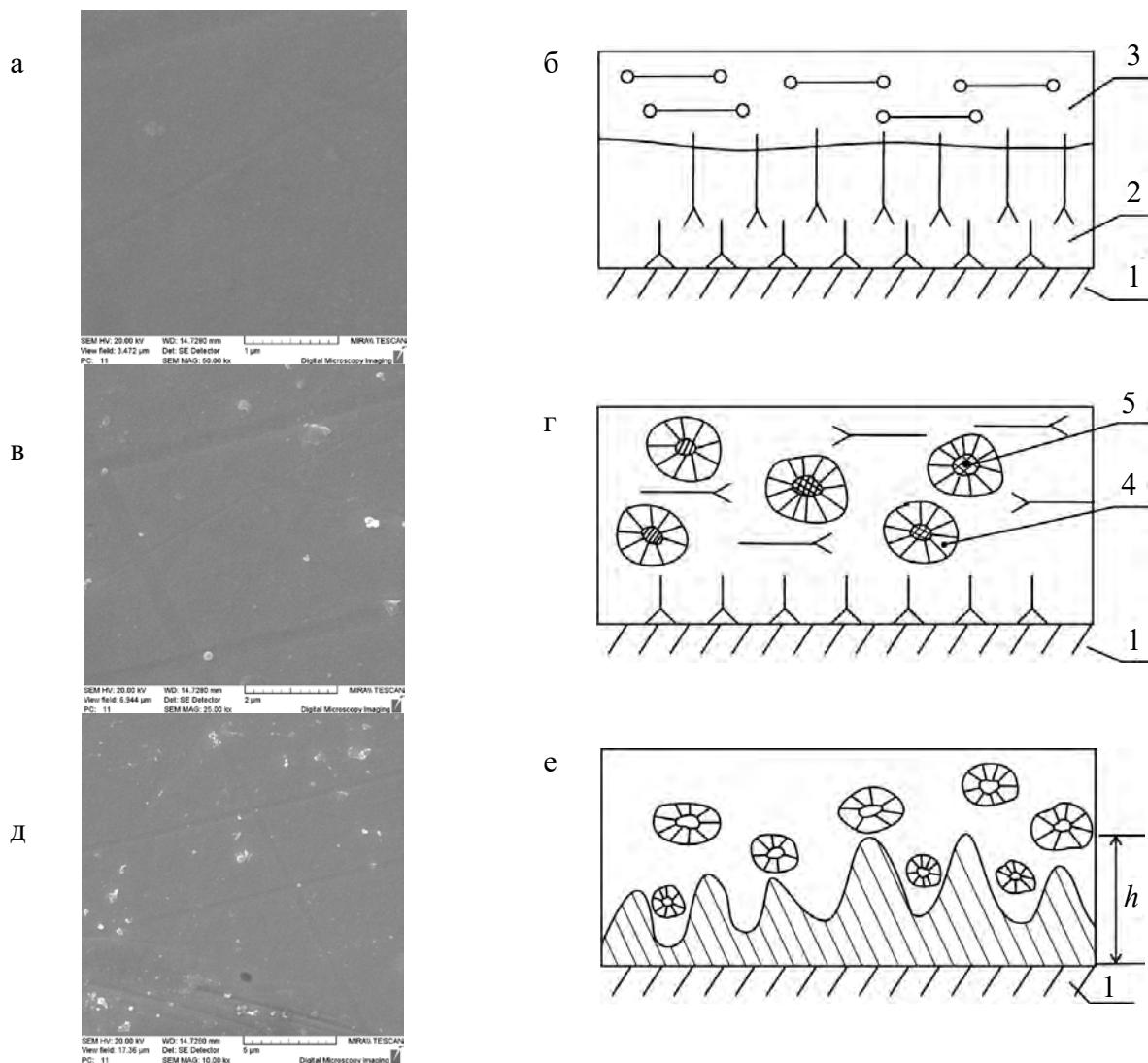
**Рисунок 5. – ТСТ-спектры композиционных тонкослойных покрытий, сформированных на металлической поверхности**

Нанесение фторсодержащих олигомеров на металлы приводит к образованию нанофазных композиционных материалов, которые обладают электретным состоянием, что подтверждается наличием тока проводимости со значениями, лежащими в области от  $|1-5|$  пА при нормальных условиях проведения эксперимента. Установлено, что увеличение толщины покрытия фторсодержащих олигомеров приводит к уменьшению значений тока проводимости (рисунок 6), что объясняется экранирующим действием покрытия зарядовой мозаики твердых поверхностей слоями фторсодержащих олигомеров. Однако, превышение толщины фторсодержащего покрытия на металлической поверхности 1,0-1,2 мкм приводит к уменьшению экранирующего эффекта вследствие явления разупорядочения в граничных слоях покрытия.

Зарядовая активность металлической подложки оказывает существенное влияние на активность формируемого фторсодержащего покрытия. Установлено наличие пикоамперных токов в покрытии, сформированном из неполярных фторсодержащих олигомеров, причем значения токов по величине превосходят значения токов, возникающих в покрытиях, сформированных из полярных олигомеров. Данный эффект можно объяснить тем, что скорее всего хемосорбция полярных фторсодержащих олигомеров происходит в первую очередь по активным (зарядовым) центрам металлической поверхности. Изменение значений термостимулированных токов в покрытиях, сформированных из неполярных олигомеров на металлической подложке, фактически не зависит от толщины покрытия при обработках металлической поверхности фторсодержащими олигомерами больше двух раз.

Наиболее сильным ориентирующим действием на ФСО обладает медь, затем алюминий и железо. Нанесение фторсодержащих олигомеров на щелочно-галоидные кристаллы приводит к значениям угла, лежащим в области  $55^{\circ}44'8''$ , что соответствует изотропной структуре в пленках ФСО. Методом МНПВО ИК-спектроскопии установ-

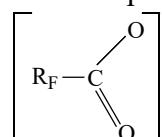
лено появление дополнительных полос поглощения в спектрах ФСО на металлических подложках. Так появление полос поглощения в области  $1370\text{--}1230\text{ см}^{-1}$  при осаждении фторсодержащих олигомеров на алюминиевую подложку соответствует карбоксилатным соединениям алюминия, полосы поглощения  $1020\text{ см}^{-1}$  и  $1630\text{ см}^{-1}$  – бидентатному бикарбонатиону.



**Рисунок 6. – Морфология (а, в, д) и схема строения (б, г, е) покрытий из фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» на подложке из стали 45 двухслойных (а, б), наполненных наночастицами (в, г), нанесенных на активный подслой нитрида титана (д, е)**

Наличие на поверхности алюминия льюисовских и бренстедовских активных центров является причиной осуществления двух видов взаимодействия Ф1 с алюминиевой подложкой. Наличие активных полярных групп в молекуле фторсодержащего олигомера приводит к взаимодействию с металлическими поверхностями с образованием химически адсорбированных соединений. Так обработка фолеоксом Ф1 медной

подложки приводит к образованию соли кислот



, что подтверждается по-

явлением полосы поглощения в области  $1660\text{ cm}^{-1}$ . Обработка Ф1 поверхности железа приводит к координации СООН-групп по типу бидентантного лиганда. Установлено, что ориентация фторсодержащих олигомеров на поверхности металлических подложек в определенной мере зависит от строения полярной группы.

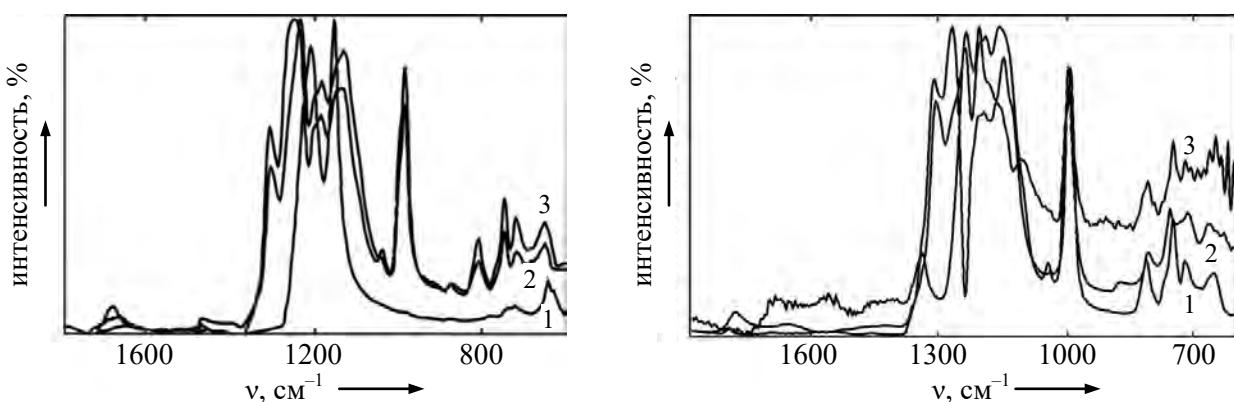
Покрытия, сформированные из сочетания полярных и неполярных олигомеров, позволяют получить защитные слои, в которых сочетается высокая химическая адсорбционная активность, которую обеспечивает полярный олигомер и поверхностный слой, сформированный из неполярного олигомера с низким значением сопротивлению сдвигу. Данные покрытия обладают высоким экранирующим эффектом зарядовой поверхности твердого тела.

Использование олигомеров различного состава (полярных и неполярных) позволяет сформировать покрытие, сочетающее хемосорбционный слой из полярного олигомера с повышенной адгезионной прочностью 2, и поверхностный слой 3, обладающий низким сопротивлением сдвигу (рисунки ба, бб). Нанофазные покрытия, полученные из смеси олигомеров различного строения, применяют в прецизионных трибосистемах с заданным ресурсом эксплуатации.

Структурирование матриц может быть достигнуто и путем введения в их состав или в состав подложки низкоразмерных частиц, обладающих нескомпенсированным зарядом, обусловленным особенностями синтеза или подготовки (например, диспергирования в дисембраторах). В результате данного модифицирования в покрытии формируются структурированные области 4 и псевдокристаллические нанофазы 5 (рисунки бв, бг).

Введение в металлические покрытия активных наноразмерных частиц увеличивает хемосорбционное взаимодействие фторсодержащих олигомеров и электролитических покрытий. Так для Ф14 появляется дополнительная полоса в области  $1340\text{ cm}^{-1}$ , при нанесении ФАК2 наблюдается интенсивная размытая полоса поглощения в области  $1580\text{--}1660\text{ cm}^{-1}$  (рисунки 7, 8).

Проведенные поляризационные исследования показывают, что укладка макромолекул в тонких слоях до  $0,1\text{ мкм}$  осуществляется перпендикулярно подложке. С увеличением толщины покрытия происходит переориентация молекул с перпендикулярной укладки молекул на параллельную относительно подложки.



1 – политетрафторэтилен (плазмохимическое осаждение); 2 – Ф1 (1 обр.); 3 – ФА (1 обр.)

Рисунок 7. – ИК-спектры поглощения фторсодержащих олигомеров, нанесенных на подложку из электролитического хрома, модифицированного ультрадисперсными кластерами алмаза

1 – ФАК2; 2 – Ф1; 3 – Ф14  
Рисунок 8. – ИК-спектры поглощения фторсодержащих олигомеров, нанесенных на подложку из нитрида титана

Наибольшая толщина покрытия достигается при трехкратной обработке поверхности модифицированного электролитического хрома и составляет  $\sim 1$  мкм. Дальнейшая обработка фторсодержащими олигомерами подложки из модифицированного электролитического хрома не ведет к значительному росту толщины покрытия. Такое поведение на хромалмазной подложке характерно для всех исследуемых фолеоксов. Полярные фолеоксы образуют более тонкое покрытие по сравнению с неполярными. По-видимому, полярные группы, осаждаясь на активных центрах хромалмазных покрытий, уменьшают действие силового поля поверхности, в результате чего снижается толщина формируемого покрытия. Аналогичный эффект образования хемосорбционных связей наблюдается в случае обработки металлических соединений фторсодержащими олигомерами. Так формирование тонких покрытий ФСО из полярных олигомеров на подложке из нитрида титана сопровождается образованием химических связей, о чем свидетельствует появление дополнительных полос поглощения в области  $1680\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$  (рисунок 8).

Обработка фторсодержащими олигомерами полимерных материалов не приводит к существенным изменениям в структуре формируемых покрытий. Методом ИК-спектроскопии установлено, что нанесение фторсодержащих олигомеров на эластомерные подложки приводит к увеличению интенсивности характерных полос поглощения, наблюдается появление полос поглощения  $1050\text{ cm}^{-1}$ ,  $1640\text{ cm}^{-1}$ , которые можно отнести к карбоксилатным комплексам. Формирование фторсодержащих покрытий из растворов на поверхности ПА6 приводит к аналогичным эффектам, характерным как и для эластомерных подложек.

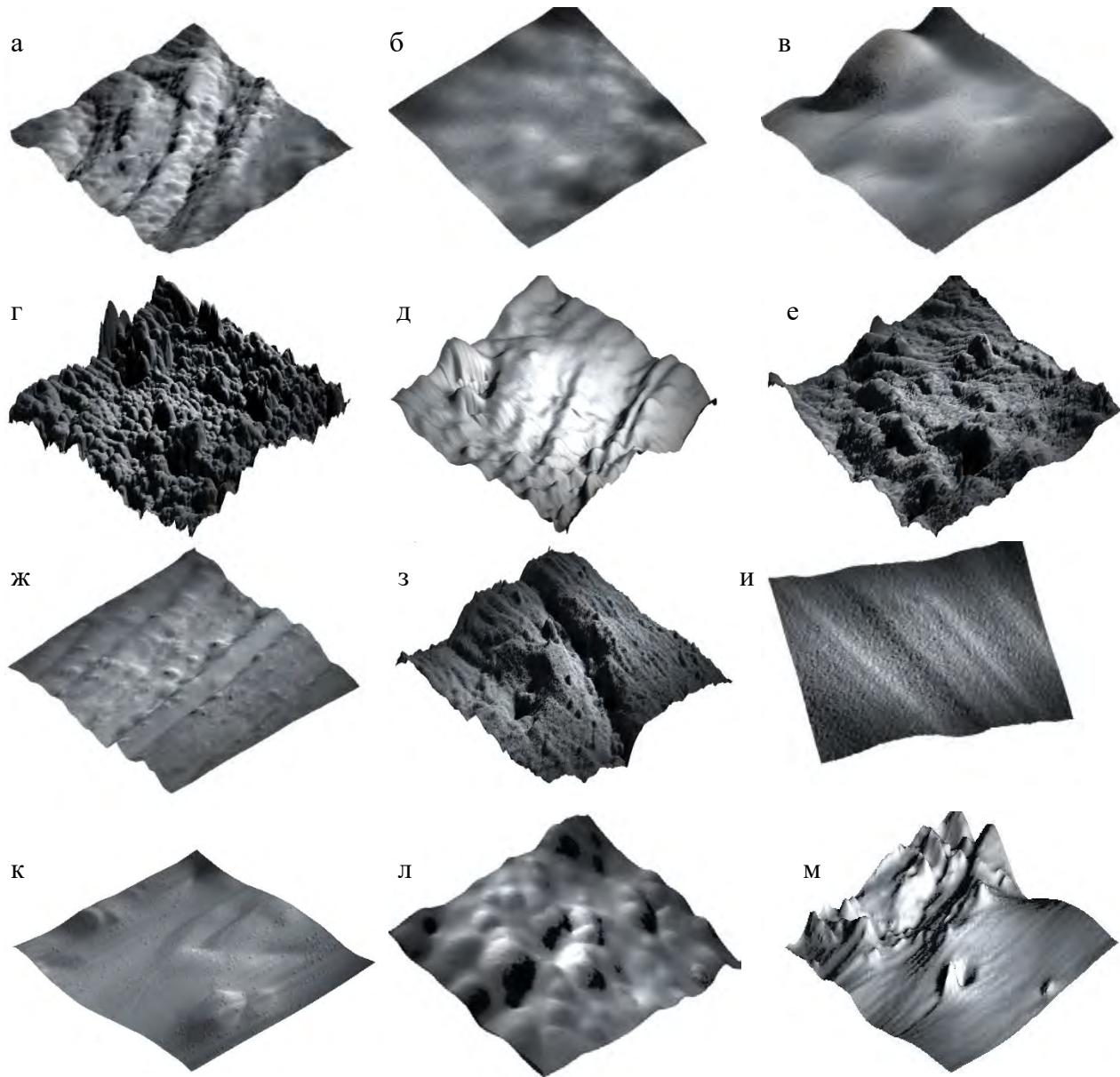
Топография поверхности металлических подложек после нанесения фторсодержащих олигомеров претерпевают существенные изменения (рисунок 9).

Нанесение полярного фолеокса на металлическую поверхность закрывает исходный рельеф и образует пологий рельеф. Нанесение повторных слоев приводит к изменению топографии поверхности, образуется мелкодисперсная структура с размерами фрагментов 0,5 мкм.

Формирование покрытий из неполярных фолеоксов приводит к образованию развитой поверхности, причем слой «фолеокса» не закрывает исходную поверхность, а образует островковый рельеф. Дальнейшее нанесение неполярного фолеокса на металлическую поверхность приводит к увеличению размеров «островков» фторсодержащих олигомеров (рисунок 9).

Обработка фторсодержащими олигомерами хромалмазной подложки приводит к сглаживанию исходного рельефа поверхности. Увеличение толщины покрытия приводит к закрытию исходного рельефа подложки с образованием собственного пологого рельефа.

Изучена морфология тонкослойных фторсодержащих покрытий, сформированных на подложке из нитрида титана. Рассмотрены два типа обрабатываемых подложек: «тонкая», не содержащая капельной фазы, и «толстая», в которой имелась капельная фаза. Установлено, что с увеличением толщины покрытия, сформированного из полярного фолеокса, формируется гладкий сплошной слой олигомера с равномерной морфологией. Поверхностные дефекты подложки выравниваются, и при 10 слоях практически не проявляются. Обработка «тонкой» подложки из нитрида титана неполярным фторсодержащим олигомером качественно изменяет топографию и морфологию поверхности. Вначале происходит выглаживание поверхностного рельефа, а затем формирование собственной структуры, в которой в роли центров кристаллизации выступают поверхностные дефекты подложки.



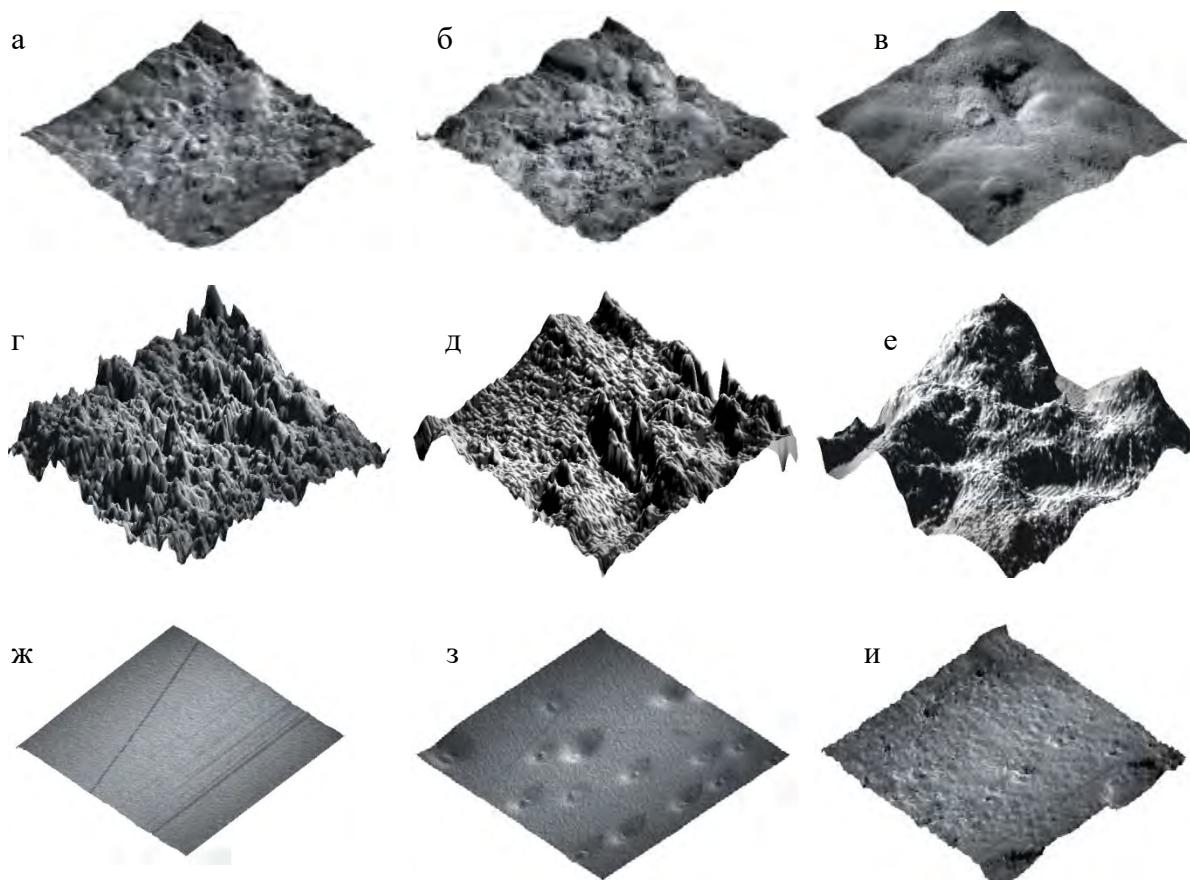
**а, г, ж – исходная поверхность; б, з – 1 слой Ф1; д – 1 слой ФАК1; в, и – 10 слоев Ф1; е – 10 слоев ФАК1; к – 1 слой Ф14; л – 5 слоев Ф14; м – 10 слоев Ф14; а-в, к – медь; г-е, л – нитрид титана; ж-и, м – сталь**

**Рисунок 9. – Морфология поверхности металлической подложки после обработки фолеоксами Ф1, ФАК1 и Ф14 (поле сканирования 12×12 мкм)**

Обработка полярным фолеоксом «толстой» подложки нитрида титана при небольших толщинах олигомерного покрытия приводит к образованию равномерного слоя гомогенного строения. С увеличением толщины покрытия олигомером, возрастает количество неоднородностей на поверхности, что обусловлено ориентирующим действием капельных частиц покрытия из нитрида титана. Олигомер марки Ф14, как и в случае тонкой подложки, формирует на поверхности образца упорядоченные агрегаты размером 3-4 мкм. Расположение этих агрегатов произвольно и, очевидно, связано с микронеровностями, сформированными на подслое. Увеличение толщины олигомерного слоя принципиально не меняет характера геометрии рабочей поверхности, а только приводит к увеличению размеров глобулоподобных олигомерных фрагментов [4].

Данные АСМ подтверждают полученные ранее результаты, что на поверхности металлов независимо от их состава при обработке полярными ФСО образуется структура типа «sandwich», т.е. структура, в которой граничный слой с молекулами, ориентированными перпендикулярно подложке, с увеличением толщины покрытия закрывается слоем с молекулами, ориентированными параллельно. Ориентация фторсодержащих олигомеров в значительной мере определяется подложкой, на которую наносится ФСО, полярной группой и молекулярной массой.

Нанесение пленок из фторсодержащих олигомеров на полимерные подложки приводит к качественному изменению топографии и морфологии поверхности. Исходная поверхность сшитого эластомера представляет собой совокупность глобулярных фрагментов с размерами и высотной характеристикой  $Ra = 320$  нм. Нанесение на подложку первого слоя олигомера Ф1 сглаживает исходный рельеф и образует собственный. Повторная обработка поверхности приводит к формированию сплошной пленки с высотной характеристикой  $Ra = 166,5$  нм. Подобный характер изменения характеристик поверхности наблюдается и при обработке олигомером Ф14. При использовании олигомера Ф14 ориентирующее действие подложки проявляется в меньшей степени, поэтому сформированная пленка незначительно изменяет шероховатость поверхности образца (рисунок 10).



**а, ж – исходная поверхность; б, д, з – однократная обработка; в, е, и – пятикратная обработка; г – фторопластовое покрытие; б, в, з, и – Ф1; д, е – Ф14;**  
**а-е – эластомерная подложка; ж-и – стеклянная подложка**

**Рисунок 10. – Морфология поверхности образца из резины и стекла после обработки фторсодержащими олигомерами Ф1, Ф14. Площадь сканирования 25×25 мкм**

Обработка поверхности полимерных эластомеров фторсодержащими олигомерами формирует пленку, включающую в себя упорядоченные агрегаты размером 3-4 мкм. Увеличение толщины олигомерного слоя принципиально не меняет характер геометрии рабочей поверхности, а только приводит к увеличению размеров глобулоподобных олигомерных фрагментов.

Формирование фторсодержащих покрытий на полиамидной подложке приводит к сглаживанию исходного рельефа. Исходный полимерный ровинг имеет множество микродефектов размерами от 528 нм до 874 нм в ширину, и 65 нм в глубину. Обработка подложки фторсодержащим олигомером Ф1 приводит к существенному сглаживанию поверхности, значение высотной характеристики при этом уменьшилось с  $R_a = 134,3$  нм до  $R_a = 122,0$  нм. Исходя из данных фазового контраста атомно-силовой микроскопии, покрытие фторсодержащего олигомера неоднородно по жесткости вследствие его неравномерного распределения по поверхности полиамидного волокна.

Таким образом, установлено, что существующая зарядовая мозаика, как на неметаллах, так и на металлических подложках приводит к процессам структурирования в покрытиях, сформированных из растворов фторсодержащих олигомеров. Образование химических связей между покрытием из фторсодержащего олигомера и металлом сопровождается установлением связей типа солей высших кислот. Геометрические размеры кристаллических и аморфных областей покрытия, их морфология и топография определяются полярностью молекулы олигомера и концентрацией раствора. Методами растровой электронной, атомно-силовой, оптической микроскопии установлено, что полярные олигомеры (Ф1, ФАК1, ФАК2) образуют, как правило, на металлических подложках сравнительно однородную пленку, а неполярные (Ф14) – островковую пленку.

Комплексные исследования структуры и свойств тонкопленочных покрытий, сформированных на подложках металлических соединений, показали, что независимо от молекулярной структуры фторсодержащих олигомеров образуются устойчивые пленки, изменяющие адсорбционную активность поверхностных слоев. Введение ультрадисперсных модификаторов (УДАГ,  $Al_2O_3$ ) в состав металлической подложки или их соединений приводит к интенсификации хемосорбционного взаимодействия, одновременно наблюдается «заличивание» микродефектов поверхности. Наличие наномодификаторов в структуре подложки усиливает упорядочивающее действие подложки на ориентацию молекул при формировании покрытия. Перпендикулярная укладка макромолекул относительно подложки осуществляется до толщины ~0,1 мкм. Ориентирующее влияние подложки, содержащей наномодификаторы, достигает максимума при трехкратной обработке раствором ФСО, а затем ослабевает. Введение в состав фторсодержащих покрытий нанодисперсных частиц усиливает ориентационные эффекты, приводя к образованию малых атомных агрегаций. Данные кластерные образования состоят из твердого ядра (наночастицы), окруженного «шубой» из ориентированных относительно ядра молекул фторсодержащего олигомера. Данные кластерные образования могут взаимодействовать между собой и (или) с твердой поверхностью подложки, при наличии в составе подложки активных центров. При формировании покрытий из фторсодержащих олигомеров на неметаллах (полимерные материалы) ориентационные эффекты в граничных слоях слабо выражены, и образование «сэндвич»-структуры не наблюдается. Однако, при наличии на поверхности полимерного материала различного типа активных центров (расположение которых в большинстве случаев совпадает с за-

рядовой мозаикой) ориентационные эффекты имеют преобладающее влияние на формирование квазиупорядоченной структуры, и наблюдается образование структур, характерных как и при формировании фторсодержащих покрытий на металлах [5]. Введение в состав фторсодержащих покрытий нанодисперсных частиц усиливает ориентационные эффекты, приводя к образованию кластерных структур. Аналогичный механизм формирования фторсодержащих покрытий наблюдается в случае формирования на подложках из слюды и стекла.

### **Заключение**

Изучена кинетика формирования фторсодержащих покрытий на металлических и неметаллических подложках. Установлено, что в процессе формирования покрытия основной структурной составляющей является «сэндвич»-структура, которая образуется независимо от типа структуры фторсодержащего олигомера. «Сэндвич»-структура состоит из аморфной (неупорядоченной) области, в которую вкрапленыnanoструктурные квазикристаллические (упорядоченные) области. Основным механизмом взаимодействия между металлической подложкой и фторсодержащим покрытием является химическое взаимодействие (хемосорбция), в результате которой образуются связи типа солей высших кислот. Полярность молекулы олигомера, концентрация раствора фторсодержащего олигомера оказывают решающее влияние на геометрические размеры кристаллических и аморфных областей покрытия, их морфологию и топографию. Как правило сравнительно бездефектное покрытие образуют полярные фторсодержащие олигомеры Ф1, дефектное («островковое» покрытие) образуют неполярные ФСО (Ф14).

Исследованы структура и свойства тонкопленочных покрытий, сформированных на неметаллических подложках. Нанесение фторсодержащих олигомеров на неметаллические поверхности изменяет адсорбционную активность поверхностных слоев, что позволяет сформировать устойчивые покрытия независимо от молекулярной структуры фторсодержащего олигомера. Данные покрытия остаются устойчивыми в процессах взаимодействия с эксплуатационными средами. Установлено, что применение покрытий, сформированных из полярных фторсодержащих олигомеров (Ф1), эффективно по сравнению с покрытиями, сформированными из неполярных олигомеров (Ф14).

### **Список использованных источников**

1. Тонкопленочные нанокомпозиционные и нанофазные покрытия для узлов трения / Е.В. Овчинников [и др.] // Инженерный вестник. – 2009. – № 1 (27). – С. 83-91.
2. Овчинников, Е.В. Наноструктурированные фторсодержащие покрытия / Е.В. Овчинников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2-3 (299). – С. 60-67.
3. Металлополимерные нанокомпозиты: особенности структуры, технология, применение / А.А. Рысколов [и др.]; под научн. ред. В.А. Струка, В.А. Лиопо. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 336 с.
4. Овчинников, Е.В. Морфология и физико-механические свойства покрытий из нитрида титана, модифицированных фторсодержащими олигомерами и полимерами / Е.В. Овчинников // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага універсітэта імя Янкі Купалы. Се-

---

рыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. – 2000. – № 1 (3). – С. 62-66.

5. Металлополимерные покрытия на основе модифицированного хрома и фторсодержащих олигомеров / А.И. Мамончик [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 1998. – Т. 3, № 2. – С. 101.

---

**Auchynnikau Y.V.**

### **Peculiarities of formation of fluorinating coatings on solid substrates**

*The article presents the results of studies on the fundamentals of the technology for the formation of nanophase and nanocomposite fluorine-organic coatings, the development of the foundations for technological and practical applications, and principally new engineering tribotechnical coatings with enhanced performance characteristics. The regularities of the formation of nanophase and nanocomposite coatings from fluorine-containing oligomers on metallic and nonmetallic surfaces were studied in connection with the conditions and technology for the formation of coatings from fluorine-containing polymers and oligomers. The analysis of the factors that have the greatest effect on the formation of thin-film nanophase and nanocomposite coatings formed by plasma-chemical and solution methods is carried out.*

**Keywords:** fluorine-containing oligomers, nanoparticles, dimensional boundary, structure, quantum theory.

Поступила в редакцию 26.02.2018 г.

УДК 539.231,620.179.112

## ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ КОЛЕЦ

Попова М.А., Попов А.Н. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь), Казаченко В.П. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

*Представлены результаты разносторонних испытаний уплотнительных колец на основе бутадиен-нитрильных резин, модифицированных углеродными покрытиями. Модификация увеличивает ресурс работы более чем в 3 раза.*

**Ключевые слова:** *бутадиен-нитрильные резины, уплотнительные кольца, углеродные покрытия, модификация, износостойкость, герметичность*

### Введение

В настоящее время одной из основных задач в развитии уплотнительной техники является повышение ресурса работы уплотнений и улучшение их эксплуатационных характеристик. Уплотнительные устройства (кольца, манжеты и др.) применяют в подвижных и неподвижных соединениях гидро- и пневмосистем машин и механизмов для разделения сред с различными физическими свойствами и параметрами. Широко применяют уплотнительные элементы на основе резин, обладающих высокой эластичностью, газо- и водонепроницаемостью, высоким электросопротивлением, достаточной теплостойкостью при невысокой стоимости.

Распространенной причиной потери работоспособности гидро- и пневмосистем машин и механизмов является выход из строя уплотнительных элементов герметизирующих устройств, призванных обеспечить минимальную утечку рабочей среды в широком диапазоне температур и давлений [1]. Замена недорогих уплотнений связана в основном с большими затратами по разборке-сборке узлов агрегатов.

В частности, резиновые уплотнительные элементы в виде колец круглого или прямоугольного сечения на основе резин, обладающих рядом ценных потребительских свойств, включая высокую эластичность и теплостойкость при малой стоимости, выходят из строя в результате выдавливания материала в зазор, чему способствует высокая частота пульсаций давления [2]. Нарушение плотности контакта резинового кольца с уплотняемыми поверхностями является следствием воздействия рабочей жидкости (масла), поскольку вымывание из резины пластификаторов, добавляемых для сохранения эластичности резины при низких температурах, вызывает значительное уменьшение объема (усадку) уплотнительного элемента.

В режиме трения разрушение резины происходит вдоль дорожки трения. Разрушение более плотного поверхностного слоя резины приводит к быстрому росту дефектов. При этом разрушение, главным образом, развивается вглубь уплотнителя. В работе [3] на примере ряда резин показано, что существует, так называемое, «критическое значение» коэффициента трения ( $>1,15$ ), выше которого износ катастрофически возрастает. Это возрастание происходит из-за перехода от усталостного механизма износа резины к износу посредством «скатывания».

Аморфные углеродные покрытия, обладающие низким коэффициентом трения, высокой микротвердостью и химической инертностью [4], нашли применение при поверхностном модифицировании резинотехнических изделий [5, 6], в частности, уплотнительных элементов гидро- и пневмосистем, таких как манжеты и кольца [7, 8].

## Основная часть

Модифицированию подвергались готовые резинотехнические изделия (РТИ), такие как О-образные кольца на основе бутадиен-нитрильных резин.

Покрытия формировались в вакуумной установке УРМ 3.279.070 из плазмы импульсного катодно-дугового разряда с центральным электродом, выполненным из графита марки МПГ-6. Перед нанесением покрытия производилась обработка ионами азота для очистки и активации поверхности резины. Углеродные покрытия, содержащие азот или фтор, формировались в среде азота или фреона соответственно. Толщина покрытий составляла  $\sim 0,1$  мкм.

Были проведены испытания модифицированных колец на износостойкость и герметичность при различных схемах.

1. Испытания О-образных уплотнительных колец на основе бутадиен-нитрильных резин размером  $105 \times 115-58$  мм на герметичность в неподвижных соединениях проводились на стенде для импульсных испытаний уплотнений гидроударом. В двух одинаковых гидроцилиндрах устанавливались исходное и модифицированное уплотнительные кольца. Импульсное давление гидравлической жидкости Mobil DTE-25 составляло 25 МПа, температура поддерживалась в пределах 50-70 °С, частота импульсов 2 Hz. В процессе испытания контролировалось два показателя: массовый износ и герметичность колец. Контроль герметичности проводился промоканием чистой фильтровальной бумагой стыка частей гидроцилиндра каждый час. Измерение массы производилось в начале испытаний, а также после 450 тыс. и 750 тыс. циклов.

2. Определение износостойкости уплотнительных колец при торцевом трении осуществлялось при помощи специальной оправки (рисунок 1).

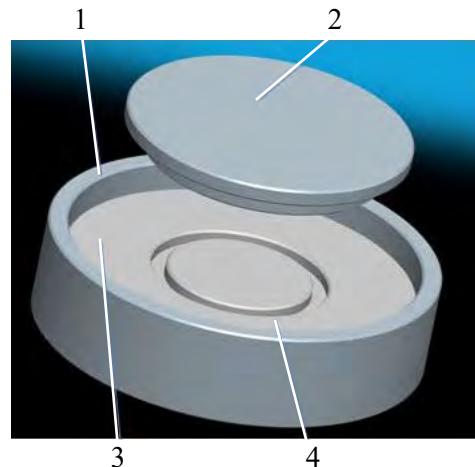
Кольцо устанавливалось в канавке тарелькообразной подставки, внешний край которой немного выше опорной плоскости подставки. Для моделирования реальной рабочей среды в подставку заливалась гидравлическая жидкость. Трение создавалось путем контакта контртела пары трения с уплотнительным кольцом путем вращения. Шероховатость контртела была близка к шероховатости канавки Ra 0.8-1.6. Контролировались сила прижатия и частота вращения. По результатам испытания определялись коэффициент трения  $f$  и изменение масс колец до и после испытания.

3. Испытания О-образных колец на трение скольжения проводились по схеме цилиндр-поршень с резиновыми кольцами (рисунок 2) на стенде для испытания гидропневматической подвески.

Режим испытаний:

- ход штока относительно основного цилиндра подвески – от 35 мм до 40 мм;
- число двойных ходов – от  $50 \text{ мин}^{-1}$  до  $60 \text{ мин}^{-1}$ .

Перед началом испытаний и через каждые 500 тыс. циклов производилось изменение контролируемых параметров – давления в гидравлической и пневматической по-



1 – край подставки; 2 – контртело;  
3 – оправка кольца; 4 – канавка для  
установки кольца

Рисунок 1. – Торцевой узел трения для  
испытания О-образных колец

лостях в статическом положении и при полностью растянутом цилиндре.

Результаты всех испытаний показали, что модифицирование РТИ покрытиями на основе углерода повышают ресурс работы.

Испытание гидроударом исходного и модифицированного О-образных уплотнительных колец показало, что по прошествии 750 тыс. циклов герметичность соединения сохранилась. После разборки гидроцилиндра на поверхности кольца без покрытия обнаружены серьезные следы износа и расслоения, в то время, как поверхность кольца с углеродным покрытием осталась без видимых повреждений (рисунок 3).



**Рисунок 2. – Резиновые кольца и поршень-разделитель**



**1 – без покрытия; 2 – с углеродным покрытием  
Рисунок 3. – Поверхность колец после 750 тыс. циклов испытания**

В процессе испытания определялась кинетика изнашивания (рисунок 4).

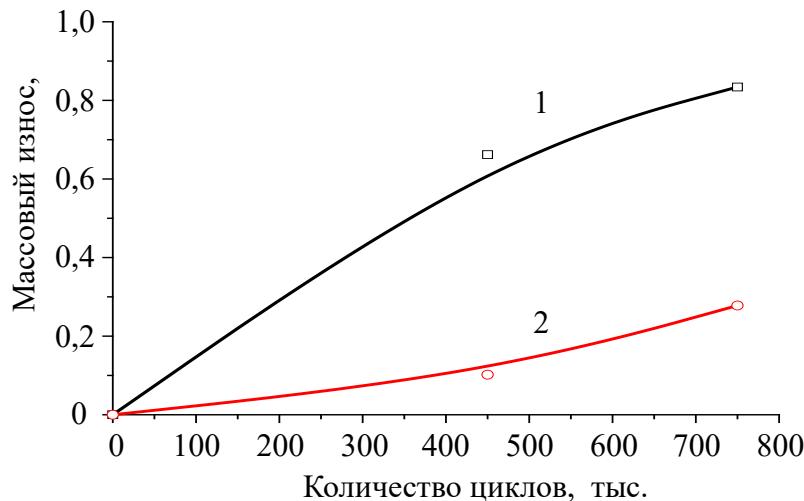
Углеродные покрытия по прошествии 450 тыс. и 750 тыс. циклов испытания позволили уменьшить массовый износ колец в 6,5 и 3 раза соответственно. В начальной стадии испытания до 450 тыс. циклов у колец без покрытия наблюдается интенсивный массовый износ с последующим уменьшением интенсивности. У модифицированных колец наблюдается более равномерный массовый износ, который по мере изнашивания покрытия возрастает.

Проведенные испытания уплотнительных колец при торцевом трении показали, что  $f$  кольца с покрытием в среде гидравлической жидкости в 1,5 раза ниже (рисунок 5).

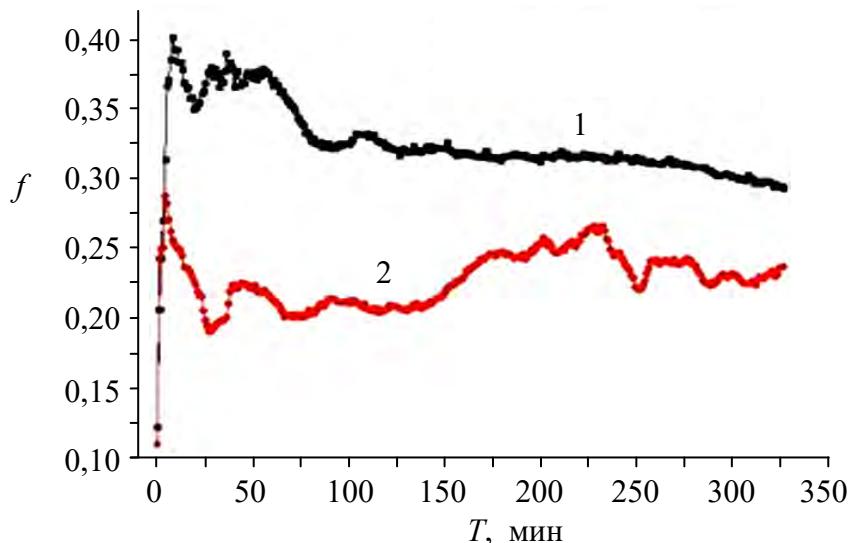
После 30 тыс. циклов потеря массы исходных колец оказалась 0,003 г, что почти в 3 раза больше износа кольца с покрытием (0,0012 г).

Стендовые испытания модифицированных О-образных колец на трение скольжения показали, что выносной упругий элемент, на поршне-разделителе которого установлены поверхностно модифицированные резиновые кольца, обеспечил работоспособность

системы подпрессоривания в объеме 3500 тыс. циклов наработки. Ранее проведенные ресурсные испытания с выносным упругим элементом, с установленным на поршне немодифицированным резиновым кольцом круглого сечения, показали, что наработка составила 1200 тыс. циклов. Таким образом, ресурс работы упругого элемента был увеличен в 3 раза.



1 – кольца без покрытия; 2 – кольца с углеродным покрытием  
Рисунок 4. – Потеря массы уплотнительных колец



1 – кольца без покрытия; 2 – кольца с углеродным покрытием  
Рисунок 5. – Поведение  $f$  в процессе трения

### Заключение

Модификация покрытиями положительно влияет на антифрикционные свойства резины, снижая силу трения скольжения, что позволяет значительно увеличить надежность изделия в узлах трения.

Снижение  $f$  приводит к уменьшению рабочих температур в узле трения, которые при повышении выше 110 °C вызывают старение резины, связанное с процессами спшивки. В результате резина становится хрупкой и при деформации растрескивается.

Разносторонние испытания, проведенные по описанным выше схемам, показали во всех случаях значительное (в несколько раз) повышение ресурса работы узлов трения металл - резина при наличии смазки или гидравлической жидкости.

### **Список использованных источников**

1. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, Варшава: ВКЛ, 1989-1990. – 3 т.
  2. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика: справочное пособие / Т.М. Башта. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1971. – 600 с.
  3. Мур, Д. Трение и смазка эластомеров / Д. Мур. – М.: Химия, 1977. – 264 с.
  4. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // Materials Science and Engineering. – 2002. – № 37. – Р. 129-281.
  5. Pei, Y.T. Flexible diamond-like carbon film coated on rubber / Y.T. Pei, X.L. Bui, van der Pal J.P., D. Martinez-Martinez, De Hosson J.Th.M. // Progress in Organic Coatings. – December 2013. – Volume 76, Issue 12. – Р. 1773-1778.
  6. Механические и триботехнические свойства резин с модифицирующими покрытиями на основе углерода / А.Н. Попов [и др.] // Материалы, технологии, инструменты. – 2015. – № 2. – С. 55-61.
  7. Зуев, Ю.С. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях / Ю.С. Зуев, Т.Г. Дегтева. – М.: Химия. – 1986. – 264 с.
  8. Трибомеханические характеристики алмазоподобных покрытий для резиновых уплотнительных колец герметизирующих устройств / А.Н. Попов [и др.] // Механика композитных материалов. – 2017. – № 3. – С. 86-99.
- 

**Popova M.A., Popov A.N., Kazachenko V.P.**

### **Experiment-industrial tests of sealing rings modified by carbon coatings**

*The results of miscellaneous experiments of sealing rings based on butadiene-nitrile rubber modified with carbon coatings are presented. Modification increases the service life of sealing rings by more than 3 times.*

**Keywords:** butadiene-nitrile rubber, o-rings, carbon coatings, modification, wear resistance, tightness.

Поступила в редакцию 02.03.2018 г.

УДК 620.197

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРА В ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА

Приходько И.В. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

*В статье рассмотрены основные закономерности диффузионного перераспределения жидкой фазы в матрице материала с использованием компьютерного моделирования, что позволило показать наличие резкой концентрационной границы образования открытых пор и связанных между собой капилляров, и соответствующее скачкообразное изменение в этой концентрационной области ряда физико-механических характеристик пластифицированных материалов, которое не связано с фазовыми переходами, а имеет статистический характер. С помощью компьютерной модели показано, что резкая интенсификация синерезиса обусловлена образованием системы связанных между собой капилляров. Обоснован выбор концентрации пластификатора и состав материала с оптимальными антакоррозионными свойствами.*

**Ключевые слова:** диффузионное перераспределение, пластифицированные материалы, компьютерное моделирование, жидкая фаза, матрица материала.

### Введение

В последнее время растет интерес к пористым полимерным материалам. Несмотря на то, что данные объекты исследуются давно, научные и заводские лаборатории вплотную занимаются проблемой пористости, а именно – изучением структуры пористых полимерных материалов, вопросами получения, формирования и разрушения пористых структур, поиском новых сфер применения. В первую очередь, это связано с тем, что данные объекты применяются во многих отраслях промышленности для решения целого ряда практических задач. В настоящее время известно большое число методов исследования пористой структуры, различающихся информативностью, чувствительностью, границами применимости. Параллельно разрабатываются и совершенствуются новые способы оценки пористой структуры. Даже в случае открытых пор, связанных между собой и имеющих выходы на поверхность, оценка пористости представляет существенную трудность. Но материал может содержать пустоты – замкнутые поры, не связанные с поверхностью. А наличие последних очень сложно установить с помощью имеющихся методов [1, 2].

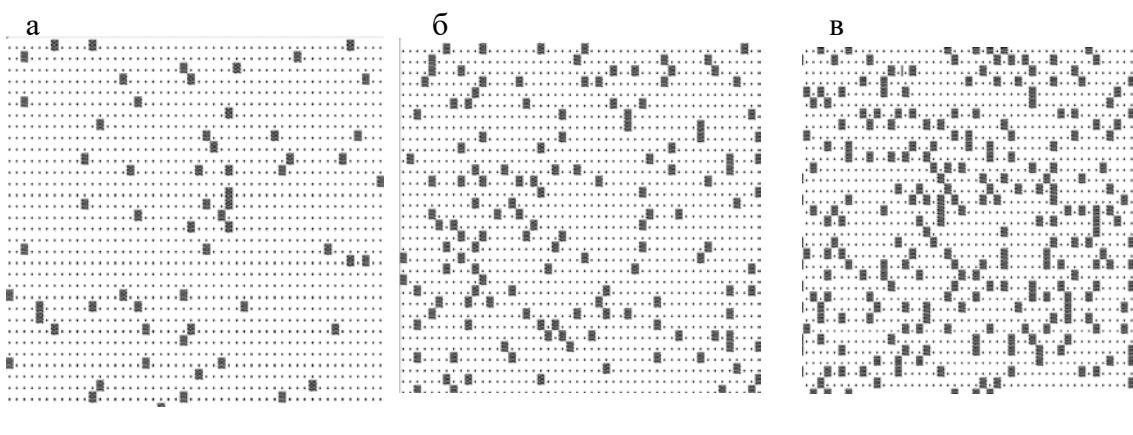
### Результаты исследований

Ряд исследований посвящен изучению структуры материалов на полимерной матрице, содержащих на различных стадиях формирования жидкости, ограниченно совместимые с полимером. Для таких материалов характерно образование системы открытых пор, заполненных жидкой фазой, способной легко перераспределяться в объеме материала. Фактически в определенном интервале концентраций 40-50 мас. % жидкости формируется система, состоящая из двух взаимодействующих фаз (твердой и жидкой). Исследование структуры полиэтилена, пластифицированного низкомолекулярной жидкостью, показало, что при содержании ее более 30 мас. % в

материале начинает образовываться пространственная сеть таких капилляров, формирование которых завершается при содержании пластификатора около 50 мас. %. Сеть образующихся капилляров как бы разбивает материал на участки от нескольких микрометров до десятков микрометров, на границах которых располагаются более крупные капилляры. Величина ячеек зависит от температурно-временного режима формирования материала и концентрации пластификатора. С ростом концентрации пластификатора увеличивается диаметр капилляров и густота сетки. Исследования структуры материала позволяют сделать вывод, что структура композиционных материалов с ограниченной совместимостью может быть представлена сочетанием элементов матричного типа, наполнителей, макро и микроскопических пор [3]. В таком упрощенном виде структура исследуемых материалов становится доступной для моделирования с использованием вычислительной техники. В связи с этим разработка доступного неразрушающего экспресс-метода оценки пористой структуры полимеров и установление условий ее формирования в процессе изготовления полимерных пленок (или волокон) является актуальной задачей.

Композиционный материал на основе полимера, пластифицированного низкомолекулярной жидкостью, представляет собой сложную термодинамическую систему, поведение компонентов которой возможно описать посредством модели. Пластификация полимера приводит к образованию пространственного каркаса, своего рода полимерной матрицы, внутри которого находятся поры или ячейки с инкапсулированным пластификатором. Результаты моделирования структуры пластифицированного полимера с помощью генератора случайных чисел приведены на рисунках 1, 3 и 4.

Разработанная компьютерная программа позволяет моделировать структуру композиции в зависимости от содержания пластификатора. Анализ полученных результатов позволяет выделить несколько типов структур в зависимости от содержания низкомолекулярной жидкости. В интервале до 15 мас. % жидкой фазы материал содержит поры длиной не более трех единиц (рисунок 2), несвязанных как между собой, так и с поверхностью полимера. Жидкость в такой системе заперта внутри, практически не имея выхода наружу.



**Рисунок 1. – Система пор в композиционном материале с содержанием пластификатора до 15 мас. %**

Увеличение концентрации пластификатора от 15 мас. % до 40 мас. % приводит к образованию систем связанных между собой пор, имеющих выходы на поверхность. Этим можно объяснить интенсификацию процесса синерезиса при сохране-

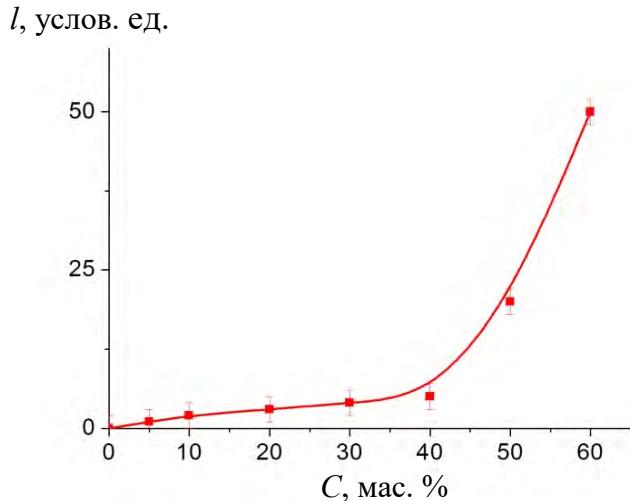


Рисунок 2. – Зависимость длины капилляра  $l$  в структуре материала от содержания пластификатора  $C$

структуре (кристалличность) и механических свойств (модуль упругости), наблюдавшихся в этой области концентраций пластификатора.

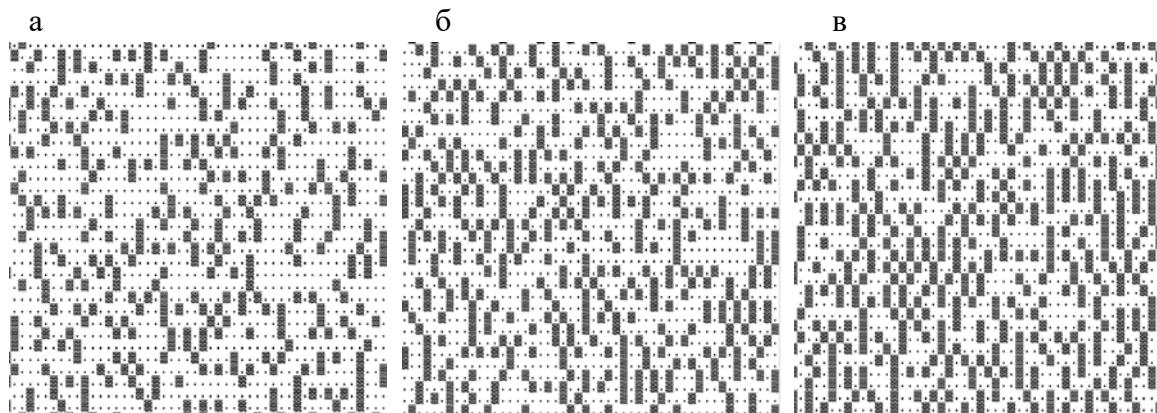


Рисунок 3. – Система пор в композиционном материале с содержанием пластификатора от 15 мас. % до 50 мас. %

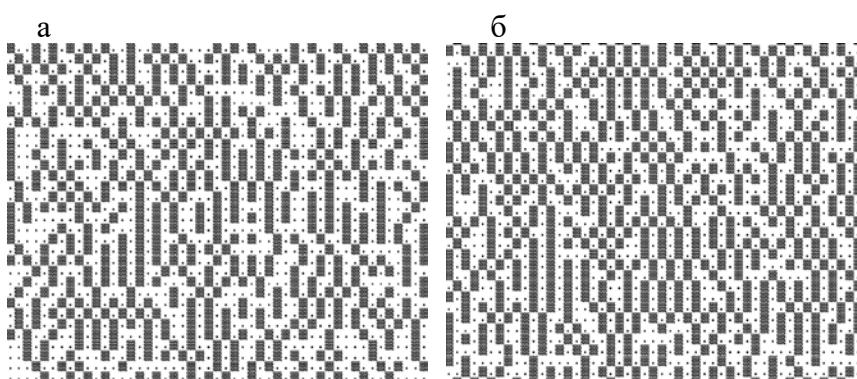


Рисунок 4. – Система пор в композиционном материале с различным содержанием пластификатора

нии механических свойств материала. При этом часть жидкости способна выпотевать наружу, обусловливая синерезис, а часть по-прежнему продолжает оставаться в закапсулированном состоянии.

С помощью моделирования структуры установлено, что наибольшее число единичных пор имеет место при содержании жидкой фазы – 20 мас. % (рисунок 5). Этот факт, который экспериментально установить затруднительно, позволяет объяснить особый характер изменения

Резкое увеличение длины пор при содержании жидкой фазы более 40-50 мас. % объясняет появление системы открытых пор, характерное согласно данным ряда исследований для приведенного состава композиционных материалов, наполненных жидкостью. Этим же обусловлено значительное снижение механических свойств материала вследствие возрастания количества и протяженности пор, образующих систему макродефектов в объеме исследуемых образцов. В получившейся структуре практически невозможно удержать жидкость за счет открытого характера каналов в сформированном материале.

Средняя длина капилляров, а также число единичных капилляров определены посредством обработки компьютерных моделей структуры пластифицированного полимера с разным содержанием пластификатора, приведены на рисунке 6. Показанная модель позволяет определить оптимальную концентрацию пластифицирующего вещества в зависимости от необходимых конечных свойств материала, которые зависят от протяженности и распределения образующихся капилляров. На рисунке 6 приведена зависимость распределения числа капилляров по длине от содержания пластификатора. Наблюдаемое снижение числа капилляров объясняется объединением мелких капилляров в более крупные с увеличением их длины.

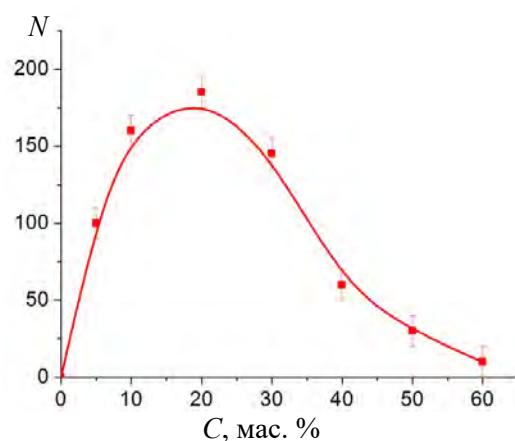
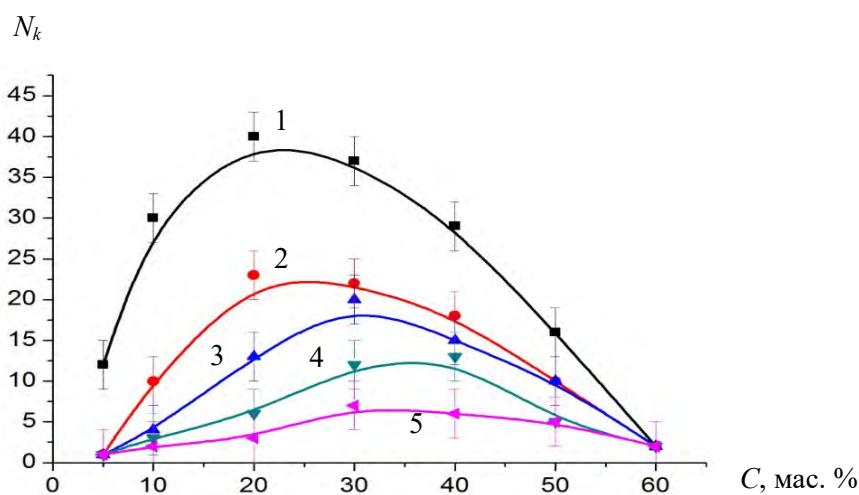


Рисунок 5. – Число единичных пор  $N$  в зависимости от содержания пластификатора  $C$ , длина которых не превышает две условные единицы



Длина: 1 – 2 услов. ед.; 2 – 3 услов. ед.; 3 – 4 услов. ед.; 4 – 5 услов. ед.; 5 – 6 услов. ед.

Рисунок 6. – Зависимость числа капилляров  $N_k$  разной длины от содержания пластификатора  $C$

При этом максимум числа капилляров при увеличении их длины может смещаться в область более высоких концентраций. Недостатком такой модели является то, что она по своей структуре – двумерная, т.е. остаются неучтенными пространственные связи, которые могут соединять между собой ветвящиеся капилляры в плоскости, перпендикулярной анализируемой.

Компьютерное моделирование позволило установить основные закономерности диффузионного перераспределения жидкой фазы в матрице материала, а также доказать, что наличие резкой концентрационной границы образования открытых пор и соответствующее скачкообразное изменение в этой концентрационной области ряда физико-механических характеристик пластифицированных материалов не связано с фазовыми переходами и имеет статистический характер. Следствием ограниченной совместимости жидких и твердых составляющих композитов является синерезис. С помощью компьютерной модели показано, что его резкая интенсификация в области 40-50 мас. % обусловлена образованием системы связанных между собой капилляров. Выделение пластификатора из полимерного материала – один из существенных недостатков пластифицированных изделий. В тоже время синерезис лежит в основе ряда высокоеффективных технологических методов, позволяющих регулировать состав и свойства поверхностного слоя изделий путем диффузионного перераспределения модифицирующих компонентов в полимерной матрице. Этот процесс сопровождается изменением объема, величина которого пропорциональна количеству отделяющейся жидкости.

В качестве пластификатора при создании композиционного материала используется целый ряд низкомолекулярных жидкостей, и все они могут являться носителями ингибиторов [3, 4]. В некоторые пластифицирующие жидкости ингибиторы добавляют специально, а некоторые являются носителями природных ингибиторов, например, нефть. Многие продукты переработки нефти являются растворителями и пластификаторами для полимеров. Однако, индивидуальные растворители полимеров, получаемые методом переработки нефти, весьма дефицитны и дороги. Основу сырой нефти составляют углеводороды предельного ряда, то есть низкомолекулярные гомологи полиолефинов, что позволяет выдвинуть предположение о возможности ее совмещения с этими полимерами. Сложный химический состав нефти существенно влияет на характер взаимодействия ее с полимерами по сравнению с индивидуальными продуктами, полученными на ее основе. Поэтому в данной работе, направление которой – создание композиционных материалов на основе полимеров и пластификаторов, изучение их совместимости является важным моментом исследования [5, 6]. Рассмотрим два вида составов. Первый состав содержит тяжелую нефть, второй – легкую нефть. Установлено, что оптимальное сочетание прочности и антакоррозионных свойств разработанного материала достигается при содержании по первому составу полиэтилена 70-75 мас. % и тяжелой нефти 25-30 мас. %, а по второму составу – полиэтилена 65-70 мас. % и легкой нефти 30-35 мас. %.

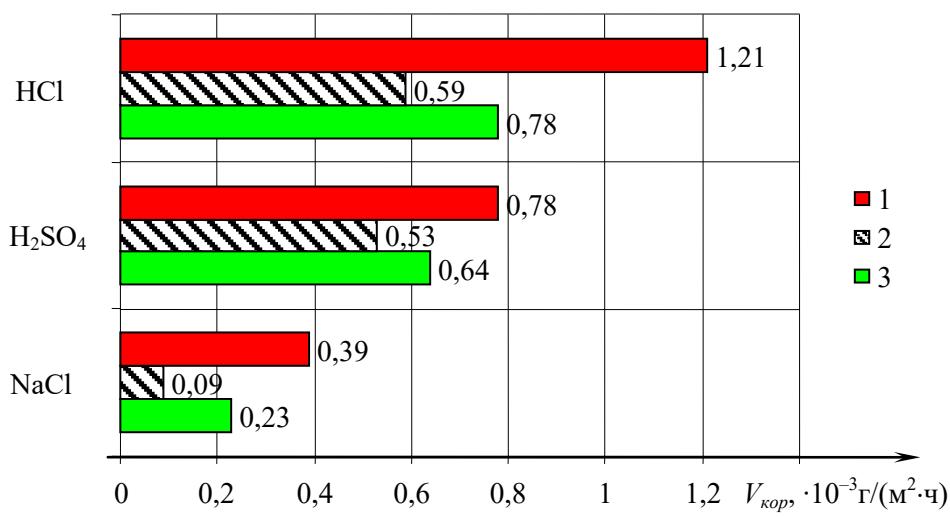
Сравнение разработанного материала с композицией для изготовления антакоррозионного материала показывает, что при таком содержании нефти материалы из данных композиций превосходят известные [7] по защитной способности. Скорость коррозии стальной пластины в контакте с образцом из композиции, содержащей 47-50 мас. % полиэтилена низкого давления, 40-50 мас. % минерального масла МС-20 и карбамида 3-10 мас. %, составляет не менее  $(0,1-0,3) \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>·ч, тогда как в аналогичных условиях для образцов из предлагаемой композиции  $(0,09-0,3) \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>·ч для первого состава и  $(0,093-0,29) \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>·ч для второго состава. Предел прочности при растяжении образца из известной композиции составляет не менее 0,9-1,3 МПа, тогда как в аналогичных условиях для образцов из предлагаемой композиции 1,33-1,41 МПа для первого состава и 1,37-1,50 МПа для второго состава [8].

Более распространенным является использование продуктов переработки нефти в качестве пластификатора полимеров. В частности, масла используются как пластификаторы уже на протяжении десятков лет. Однако, до сих пор малоизученным остается

вопрос об использовании в этих целях пластичных смазок, которые содержат в своем составе смесь минеральных масел. Их отличительной особенностью является то, что они загущены мылами. Исследование свойств отработанных консистентных смазок показало, что можно использовать их и как пластификаторы композиционных материалов и как носители ингибитора коррозии [9, 10]. Наиболее подходящим для переработки состава в пленочный материал является дистиллят талового масла, так как процесс переработки осуществляется при 150 °C, и это не уменьшает концентрации ингибитора и не влияет на его защитные свойства.

Ингибионные полимерные материалы широко применяются для защиты металлоизделий от коррозионного повреждения. Зачастую, полимерный композит (многокомпонентная система) и входящие в его состав элементы напрямую влияют на физико-химические и защитные свойства материалов [11]. Тем более, что они помимо каркасобразующей структуры и носителя ингибитора могут содержать еще и дисперсный наполнитель, выполняющий декоративную функцию и снижающий стоимость конечной продукции. В качестве инертного наполнителя использовали карбонат кальция, оксид титана и оксид алюминия, и из перечисленных составов были изготовлены пленочные упаковочные материалы.

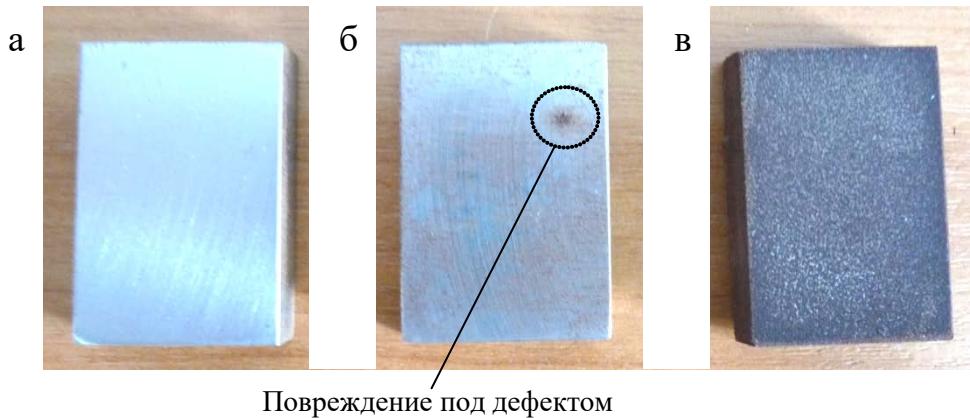
В разработанные пленочные материалы были упакованы образцы из стали (Ст. 50), подвергнутые ускоренным коррозионным испытаниям. Часть образцов специально были упакованы в пленки с дефектом диаметром 1 мм. Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что материал с оксидом титана в качестве наполнителя позволяет получить наиболее однородный и бездефектный защитный материал, а, следовательно, способный в большей степени осуществлять барьерную функцию (рисунок 7).



1 – ПЭНД + Буксол (отработка) + оксид алюминия;  
2 – ПЭНД + Буксол (отработка) + оксид титана; 3 – ПЭНД + Буксол (отработка) + мел  
Рисунок 7. – Скорость коррозии образцов из Ст. 50,  
упакованных в пленки разного состава

Характер защитных свойств аналогичен и для упаковочных материалов с дефектами. Отличие состоит лишь в том, что скорость коррозии возрастает в 3-5 раз, но лучшим результатом по-прежнему обладает материал, наполненный оксидом титана. А содержание в пластификаторе ингибитора коррозии интенсифицирует его антикоррози-

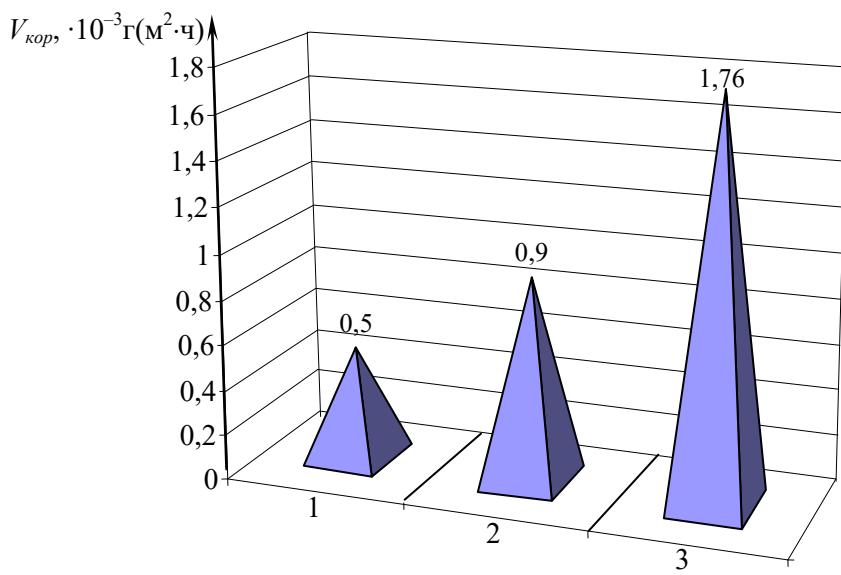
онные свойства и позволяет уменьшить размер коррозионного повреждения до размера дефекта (рисунок 8).



**а – упаковка без дефекта; б – упаковка с дефектом; в – без упаковки**

**Рисунок 8. – Внешний вид стальных (Ст. 50) образцов, упакованных в защитную пленку, после выдержки в растворе HCl, в течение 90 суток (состав пленки ПЭНД-Буксол-ТiO<sub>2</sub>-ВИТАЛ)**

На рисунке 9 приведены результаты коррозионных испытаний стальных образцов, упакованных в пленку с дефектом на основе ПЭНД, в состав которой входят отработанная смазка, оксид титана и ингибитор коррозии.



**1 – NaCl; 2 – H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3 – HCl**  
**Рисунок 9. – Скорость коррозии образцов (Ст. 50) под пленкой в разных средах**

Анализируя приведенные результаты, можно прийти к выводу, что оптимальными антакоррозионными свойствами обладает консервационный материал на основе полиэтилена низкого давления, пластифицированный отработанной пластичной смазкой Буксол, содержащий оксид титана в качестве дисперсного наполнителя и ингибирированный дистиллятом талового масла.

## Выводы

Таким образом, в результате исследования разработана компьютерная модель изменения структуры полимера при введении в него пластификатора. С ее помощью показано, что наличие сравнительно резкой границы перехода системы закрытых капилляров в открытую систему обусловлено статистическим распределением выделяющегося избытка жидкости, а не фазовым переходом. Определено оптимальное содержание пластификатора для того чтобы максимально интенсифицировать защитные функции материала при минимальном снижении его физико-механических характеристик. С целью подтверждения результатов проведены ускоренные коррозионные испытания, позволившие определить материал с наилучшими консервационными свойствами. Результаты коррозионных испытаний и исследований физико-механических свойств свидетельствуют о том, что оптимальными защитными свойствами обладает консервационный материал на основе ПЭНД, пластифицированного отработанной пластичной смазкой Буксол, наполненного оксидом титана в качестве дисперсного наполнителя и ингибиированного дистиллятом талового масла [12]. Разработанный упаковочный материал антикоррозионного назначения обладает улучшенными эксплуатационными характеристиками (повышение прочности до 1,5 раз и увеличение антикоррозионных свойств до 3 раз).

## Список использованных источников

1. Привалко, В.П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В.П. Привалко. – Л.: Химия, 1986. – 240 с.
2. Маланин, М.Н. Спектроскопическое изучение пористости полимеров: автореф. дис. .... канд. хим. наук: 02.00.04 / М.Н. Маланин; ТГУ. – Тверь, 2007. – 22 с.
3. Фирсов, Ю.И. Защитные покрытия металлов на основе модифицированного полиэтилена / Ю.И. Фирсов, Г.Г. Малютин // Защита строительных конструкций, оборудования, трубопроводов химических предприятий от коррозии. – 1975. – С. 117-126.
4. Барштейн, Р.С. Пластификаторы для полимеров / Р.С. Барштейн, Ю.С. Носовский, В.И. Кирилович. – М.: Химия, 1982. – 200 с.
5. Козлов, П.В. Физико-химические основы пластификации полимеров / П.В. Козлов, С.П. Папков. – М.: Химия, 1982. – 224 с.
6. Пономарева, Т.В. Исследование пластичных отходов за рубежом / Т.В. Пономарева, Н.Н. Лихачева, З.А. Ткачик // Пластичные массы. – 2002. – № 5. – С. 44-48.
7. Полимерная композиция для изготовления антикоррозионного материала: пат. 10153 Респ. Беларусь, МПК C08L23/00 / А.С. Неверов, Л.В. Самусева; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20051330; заявл. 29.12.05; опубл. 30.12.07 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 6. – С. 104.
8. Полимерная композиция для изготовления антикоррозионного и гидроизоляционного материала (варианты): пат. 17784 Респ. Беларусь, МПК C08L23/06 / А.С. Неверов, Ж.Н. Громыко, И.В. Приходько; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20111390; заявл. 21.10.11; опубл. 30.12.13 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6.
9. Полимерная композиция для изготовления электро-гидроизоляционного материала: пат. 2542098 RU, МПК C08L23/06, C08K3/22, H01B3/44, H01B7/28 / А.С. Неверов, И.В. Приходько; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № 2013142295/04; заявл. 16.09.13; опубл. 20.02.15 / Бюл. № 5.

10. Полимерная композиция для изготовления электро- и гидроизоляционного материала: пат. 19966 Респ. Беларусь, МПК C08L23/06, C08K13/02 / А.С. Неверов, И.В. Приходько; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20121661; заявл. 30.11.12; опубл. 30.04.16 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2016. – № 2. – С. 87.

11. Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника, 1976. – 416 с.

12. Полимерная композиция для изготовления антакоррозионного материала: заявка № а 20140688 Респ. Беларусь, МПК C08L23/00 / А.С. Неверов, И.В. Приходько, В.В. Макеев, А.П. Приходько; заявитель УО «Белорусский государственный университет транспорта». – № а 20140688; заявл. 2014; опубл. 08.12.14 / Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014.

---

Prihodzko I.V.

**The study of the optimal composition and regularities of the redistribution of plasticizer in the bulk material based on the model of the composite structure**

*The article deals with the basic regularities of diffusion redistribution of the liquid phase in the matrix of the material using computer simulation, which allowed to show the presence of a sharp concentration boundary of the formation of open pores and capillaries connected with each other and the corresponding abrupt change in this concentration area of a number of physical and mechanical characteristics of plasticized materials which is not associated with phase transitions, but has a statistical character. Using a computer model, it is shown that the sharp intensification of syneresis is due to the formation of a system of interconnected capillaries. The choice of plasticizer concentration and the composition of the material with optimal anticorrosive properties are substantiated.*

*Keywords: diffusion redistribution, plasticized materials, computer simulation, liquid phase, the matrix material.*

Поступила в редакцию 16.03.2018 г.

**Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:**

1. Соответствие статьи выбранному научному направлению: геотехнология, материаловедение или машиностроение.
2. Актуальность темы, новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, достоверность в сопоставлении с соответствующими известными данными.
3. Логика изложения и четкость формулировок.
4. Информативность и качество иллюстрированного материала.
5. Полнота списка литературы, наличие публикаций последних лет и зарубежных публикаций в данной области.
6. Соответствие аннотации тексту статьи.
7. Текст и количество иллюстрированного материала нуждается в сокращении или нет.
8. В качестве вывода просим указать мнение о возможности публикации статьи после исправлений (без исправлений) или необходимо повторное рецензирование после серьезных исправлений.

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации) на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, автореферата и публикаций по теме диссертации», утвержденной Постановлением Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 3 от 28.02.2014.

1. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде, должна иметь разрешение на опубликование, сопроводительное письмо.
  2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна, значимость результатов.
  3. Объем научной статьи по теме диссертации должен составлять не менее 14000 печатных знаков, включая пробелы, (примерно 5-6 страниц).
  4. Статья должна быть представлена в формате текстового редактора Microsoft Word. Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
  5. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии и инициалы авторов (число авторов – не более 5), полные наименования учреждений, где работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), ключевые слова (до 10), введение, основную часть, заключение, завершающее четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация, название статьи, ключевые слова, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
  6. Таблицы и рисунки располагаются непосредственно в тексте статьи. Количество рисунков и таблиц не должно превышать 8. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подрисуночную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
  7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
  8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
  9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
  10. Авторам необходимо на отдельной странице предоставить следующие сведения: фамилия, имя, отчество полностью, место работы на русском и английском языках, адрес организации и электронной почты каждого автора, почтовый адрес для переписки, номера телефонов.
1. The article should be presented in printed out and electronic forms, should have a security clearance, a covering letter.
  2. Received articles are reviewed. The main criteria of feasibility of the publication are the subject relevance, the scientific novelty, the significance of results.
  3. The volume of scientific article on the topic of thesis research must be at least 14,000 typographical units, including spaces, (approximately 5-6 pages).
  4. The article should be presented in the text editor Microsoft Word format. The font is Times New Roman, font size is 12, interval – 1.
  5. The UDC number, the article's title, the authors' surnames and initials (number of authors – maximum 5), full names of organizations where the authors work should be included in the article. The article should contain: the summary (up to 10 lines), keywords (up to 10), the introduction, the article's body, the conclusion finished by clearly formulated findings, and the list of cited references. The summary, the article's title, keywords as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
  6. Tables and figures are placed directly in the article text. The number of figures and tables should not exceed 8. The figures should be well-defined and should be created in one of graphic editors (jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd format). Each table should have a title, and each figure – a picture caption. All tables and figures should have references in the text.
  7. Formulae should be created in the «Math Type» editor program. All symbols given in the article are deciphered directly in the text; in addition the symbols may be published on a separate page.
  8. Abbreviations should not be used, except commonly used abbreviations.
  9. Presentation of references must comply with the requirements of GOST 7.1-2003. The list should be made in order as the references are mentioned in the text. The references to unpublished works are not allowed. The list should include foreign publications in this sphere (if available).
  10. The authors should provide the following information on a separate page: the surname, the first name, the patronymic name, the postal address for correspondence, the place of work and the position, phone numbers, e-mail address.



Подписные 749332  
индексы: 74933

**Основные направления научно-исследовательской деятельности  
ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:**

- совершенствование технологий добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях кровли;
- разработка горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогатительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогатительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

**Адрес редакции:**  
ул. Козлова, 69  
223710, г. Солигорск,  
Республика Беларусь,

**Телефоны:**  
(+375 174) 26 28 37 главный редактор (приемная)  
(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь  
E-mail: [onti@sipr.by](mailto:onti@sipr.by)  
<http://www.sipr.by>

ISSN 1728-3841

