

2017 № 3

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2017

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

Редакция:

Главный редактор

Щерба Владимир Яковлевич

Заместитель главного редактора

Прушак Виктор Яковлевич

Технический редактор

Барановский Анатолий Леонидович

Ответственный секретарь

Заяц Ирина Михайловна

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

Петровский Б.И. — доктор технических наук

Басинюк В.Л. — доктор технических наук

Бровка Г.П. — доктор технических наук, доцент

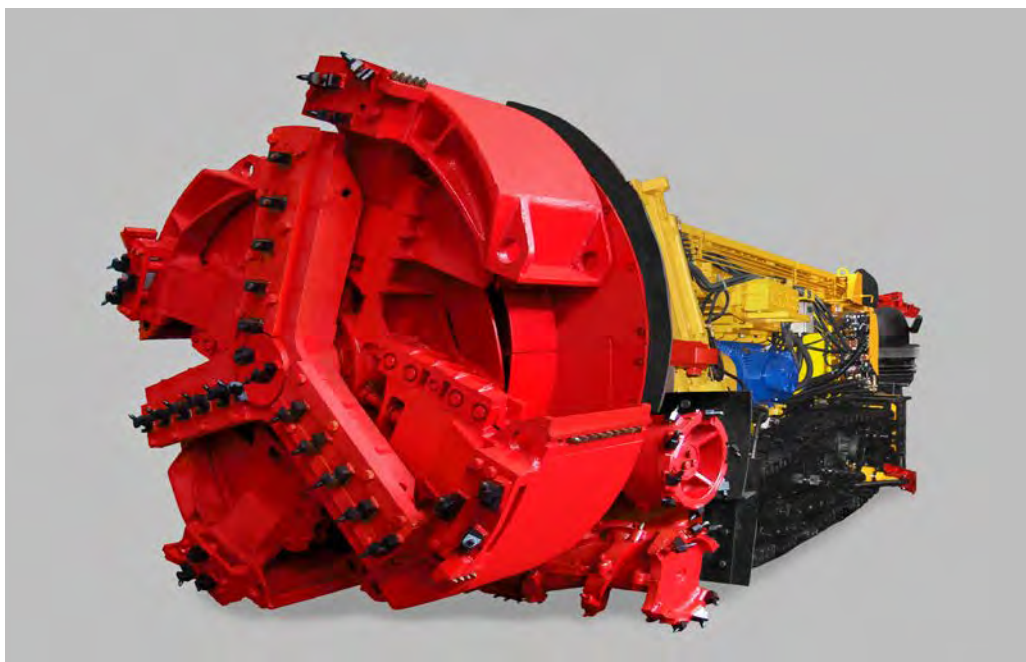
Губанов В.А. — доктор технических наук

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

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

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

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



Адрес редакции:

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

Журнал включен в перечень научных изданий РБ для опубликования результатов диссертационных исследований по научным направлениям: технические науки (геотехнология, материаловедение, машиностроение)
Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Хвесеня С.С., Денкевич Э.Т. Организация мониторинга деформаций земной поверхности и инженерных сооружений в регионе отработки месторождений калийных солей Беларуси на основе методов дифференциальной спутниковой интерферометрии с использованием активных отражателей	5
Казаченко Г.В., Нагорский А.В., Ярмолинский В.К. Математическая модель установившегося процесса горизонтального шнекового бурения	19
Кологривко А.А., Голдаев А.В., Голдаев В.А. Особенности распределения величин оседаний земной поверхности при повторной подработке	27
Поляков А.Л., Мисников В.А., Лутович Е.А., Ерохин К.А. Поддержание выработок Старобинского калийного месторождения с помощью специальных видов крепи. Часть 1. Адаптация конструкции существующих анкеров повышенной несущей способности к местным условиям	37

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Трусев И.В., Макаревич С.Д. Расширение возможностей прецессионной передачи путем реализации ею функции компенсирующей муфты	46
Павлечко В.Н. О работе радиальной турбины при вводе закрученного потока	52
Лобко В.В. Моделирование системы управления измельчительного комплекса при производстве минеральных удобрений	65

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Шаповалов В.М., Тимошенко В.В., Злотников И.И., Тартаковский З.Л., Пантюхов О.Е., Талецкий В.В. Влияние высокодисперсных метасиликатов на свойства полимеров	70
Павленко А.П., Ахраменко Н.А. Формование изделий из алюмооксидной керамики	77
Авдейчик С.В., Антонов А.С., Струк В.А., Воронцов А.С. Реализация принципа многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии полимерных композитов	86

На обложке: машина врубная баровая МВБ-140Э.
На 1-й стр.: комбайн проходческий КРП-3-660/1140.
На 3-й стр.: комбайн проходческо-очистной КПО-10,5.

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

Подписано в печать 08.09.2017 г.
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 2906. Усл. печ. л. 11,78. 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

№ 3 2017

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

Shcherba Vladimir Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy

Prushak Viktor Yakovlevich

Technical Editor

Baranovsky Anatoly Leonidovich

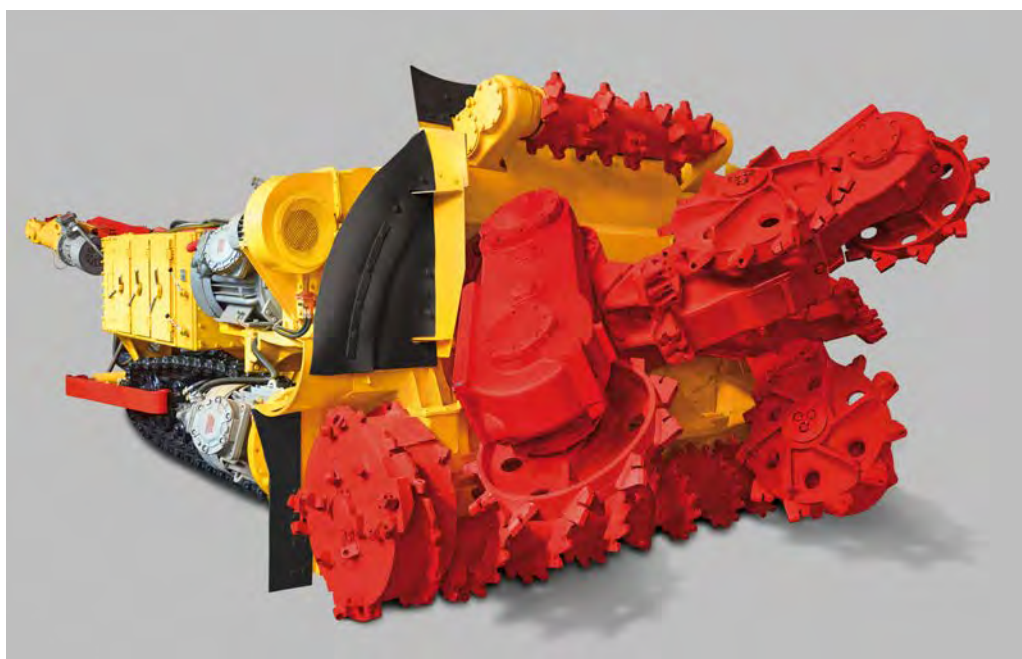
Executive Secretary

Zayats Irina Mikhailovna

Editorial Board:

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor
Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor
Danilov V.A. – Ph.D., Professor
Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor
Zubov V.P. – Ph.D., Professor
Berezovsky N.I. – Ph.D., Professor
Petrovsky B.I. – Ph.D.

Basinyuk V.L. – Ph.D.
Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor
Gubanov V.A. – Ph.D.
Zakharov Yu.N. – Ph.D., Professor
Ivanov V.P. – Ph.D., Professor
Onika S.G. – Ph.D., Professor
Struk V.A. – Ph.D., Professor

**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

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”, 2017

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Zhuravkov M.A., Kanavalau A.L., Bogdan S.I., Hvesenya S.S., Denkevich E.T. Monitoring of the land surface deformations and engineering constructions in the area of mining of Belarus potash salts deposit on the basis of differential satellite interferometry methods with the use of active reflectors	5
Kazachenko G.V., Nagorsky A.V., Yarmolinsky V.K. Mathematical model of the steady process of horizontal auger drilling	19
Kologrivko A.A., Goldaev A.V., Goldaev V.A. Specific aspects of the distribution of the value of the earth surface subsidence by the repeated underworking	27
Polyakov A.L., Misnikov V.A., Lutovich E.A., Erokhin K.A. Maintaining of Starobin potash deposit workings using special types of the support. Part 1. Requirements for maintaining of the workings using increased bearing capacity anchors	37

MACHINE-BUILDING

Gromyko P.N., Hatetovskii S.N., Trusov I.V., Makarevich S.D. Expanding of possibilities of precession transfer by implementing the compensating coupling function	46
Pavlechko V.N. Functioning of the radial-flow turbine with whirling input flow	52
Labko V.W. Mathematical modeling of ore crushing control system by the potash fertilizers manufacturing	65

MATERIALS ENGINEERING

Shapovalov V.M., Timoshenko V.V., Zlotnikov I.I., Tartakovsky Z.L., Pantiukhov O.E., Taletsky V.V. Effect of highly dispersed metasilicates on the properties of polymers	70
Pavlenko A.P., Akhramenko N.A. Molding of alumina ceramics products	77
Avdeychik S.V., Antonov A.S., Struk V.A., Vorontsov A.S. Realization of the multilevel modification principle in materials science and technology of polymer composites	86

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 528.8; 622.1; 004.9

ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В РЕГИОНЕ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ БЕЛАРУСИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКТИВНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Хвесеня С.С. (Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь), Денкевич Э.Т. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приведены результаты выполненных комплексных исследований изучения эффективности использования методов дифференциальной спутниковой интерферометрии для мониторинга оседаний и сдвижений земной поверхности в регионе Старобинского месторождения калийных солей. Выполнен анализ точности построения мультиспектральных оседаний на основе обработки INSAR-снимков. Показано, что территория Старобинского месторождения калийных солей пригодна для использования технологии спутниковой интерферометрии в качестве элемента системы мониторинга за динамикой оседаний земной поверхности в пределах шахтных полей ОАО «Беларуськалий». Важной составляющей разрабатываемой системы геомеханического мониторинга является возможность контроля не только оседаний земной поверхности, но и состояния инженерных объектов поверхности.

Ключевые слова: сдвижения и оседания земной поверхности, мониторинг разрабатываемых массивов горных пород, технологии спутниковой интерферометрии.

Введение

Технологии мониторинга сдвижений и деформаций дневной поверхности в районах интенсивного крупномасштабного освоения подземного пространства на основе спутниковой SAR-интерферометрии (synthetic-aperture radar) к настоящему времени доказали свою состоятельность и находят все более широкое прикладное применение. Повышенный интерес к таким технологиям определяется такими их характерными особенностями, как возможность получать изображение независимо от условий освещенности и облачности; высокая точность определения высот и смещений за счет использования фазовой компоненты сигнала; охват большой площади мониторинга и, как следствие, низкая себестоимость измерений по сравнению с традиционными методами.

В настоящее время в Республике Беларусь в активную разработку и эксплуатацию вводятся новые участки со сложным геологическим строением, находящиеся на больших глубинах, с большим количеством и высокой интенсивностью тектонических нарушений и другими осложняющими факторами. Поэтому, актуальной задачей является создание высокоэффективных и надежных систем мониторинга сдвижений и деформаций дневной поверхности в районах интенсивного крупномасштабного освоения подземного пространства, добычи полезных ископаемых [1-3]. Особенности новых участков разработки массивов горных пород значительно повышают риск их эксплуатации, так как могут приводить к техногенным сейсмопроявлениям (локальные земле-

трясения, горные удары, динамические срывы) и значительно повышают вероятность подтопления рудников.

В течение уже достаточно продолжительного времени коллективом, в который входят сотрудники БГУ и ОАО «Белгорхимпром», выполняются комплексные исследования по изучению эффективности использования технологий, основанных на спутниковой интерферометрии (DinSAR-технологии), для мониторинга динамики оседаний дневной поверхности в пределах шахтных полей ОАО «Беларуськалий» в зонах с интенсивным ведением горных работ в сложных горно-геологических условиях. Так, в работах [4, 5] описаны отдельные результаты выполненных исследований по изучению эффективности использования DinSAR-технологии применительно к условиям Старобинского месторождения калийных солей. Основные трудности применения технологий спутниковой интерферометрии для контроля техногенных оседаний на территории Республики Беларусь типичны для стран европейского региона и обусловлены тем, что зоны подработки располагаются, как правило, на территориях сельскохозяйственных угодий или участках местности, покрытых естественной растительностью, то есть на территориях, поверхности фазовых откликов которых не обладают высокой стабильностью [5].

В данной работе изложены результаты новых исследований.

1. О выборе участков проведения SAR-съемки

Далее описаны результаты выполненных исследований по изучению процессов сдвижений и оседаний на основе DinSAR-технологии для территории горных отводов третьего и четвертого рудоуправлений (РУ-3, РУ-4). В пределах шахтных полей данных рудоуправлений было выбрано пять участков. Выбор именно этих участков обусловлен тем, что в период съемок (в течение 2016 года) на данных участках велись активные горные работы и, кроме того, сотрудниками ОАО «Белгорхимпром» осуществлялись инструментальные наблюдения за процессами оседаний дневной поверхности.

Приведем некоторые характерные сведения относительно выбранных участков наблюдений.

1. Лава 11-А-2 на 4 РУ. В районе формирования мульды оседания заложена профильная линия длиной около одного километра. Линия содержит 11 реперов, по которым в течение интервала съемки проводились наблюдения (замеры координат с использованием GPS-станции). Рассчитанный центр мульды на момент наблюдения должен был находиться в точке с местными координатами $Y = 35800$, $X = 11600$ (южная окраина деревни). Предполагаемая рассчитанная скорость оседания поверхности в центре мульды составляет 10-15 мм/сут.

2. Лава 19-2 на РУ-4. В районе формирования мульды оседания заложена профильная линия длиной около одного километра. Центр мульды на момент наблюдения должен находиться в точке с местными координатами $Y = 33600$, $X = 14400$ (севернее деревни). Предполагаемая скорость оседания поверхности в центре мульды – 5-10 мм/сут. Место наблюдений интересно тем, что лава здесь останавливается на частичный демонтаж. В связи с этим скорость оседания, регистрируемая с помощью первой интерферометрической пары (28-8), должна быть меньше, чем скорость по второй интерферометрической паре (8-19). Кроме того, справа по движению лавы имеется соседняя лава, отработанная в 2011 году. Наличие отработанного пространства должно отражаться в несимметричности формы мульды оседаний.

3. Комплекс лав на Березовском участке. Данный участок интересен тем, что одновременно работает пара лав. Поэтому, по предварительно выполненному модельному анализу должна наблюдаться «двухядерная» мульда. В районе ведения горных работ

имеется профильная линия, состоящая из 8 реперов, заложенных примерно через 100 метров вдоль автодороги на Любань. Центр северной (более глубокой) мульды должен находиться в точке с координатами $Y = 37000$, $X = 7000$. Ожидаемая скорость оседаний составляет около 15 мм/сут.

4. Лава 102 на РУ-1. В районе лавы имеется наиболее представительная профильная линия, включающая 27 реперов. В период съемки интервал наблюдения – еженедельный. Зафиксированная на начало момента съемок скорость оседаний составляет 7-12 мм/сут.

5. Точка шахтного поля с координатами $Y = 34500$, $X = 19600$. В этом месте одновременно работают 4 лавы РУ-3, что должно формировать сложную мульду оседания.

При выборе размещения рамки снимка руководствовались тем, что снимок должен включать в себя помимо всех перечисленных выше участков наблюдений также максимальную часть горных отводов рудников ОАО «Беларуськалий».

Для выбранного разрешения (StripMap) платформы TerraSAR-X были проанализированы возможные положения рамок снимков. Обозначенным выше условиям для платформы TerraSAR удовлетворяла позиция «стрип 11R». В рамку снимка попадают горные отводы РУ-3 и РУ-4, а также часть горного отвода РУ-1. Необходимость включения в проводимый анализ территории РУ-4 обусловлена высокими скоростями оседания поверхности и существенными особенностями геологического строения подрабатываемого массива. Съемки проводились осенью 2016 года.

2. Построение мульды оседаний на основе SAR-данных с использованием информации о положении контрольных отражателей

В соответствии с выбранными параметрами была выполнена SAR-съемка выбранных участков мониторинга и получены SAR-сцены в исходном формате для соответствующих дат съемок.

При построении оседаний была использована построенная цифровая модель рельефа (ЦМР). Интерферометрическая обработка проводилась в специализированном программном комплексе SARscape. В ходе построения были использованы несколько алгоритмов фильтрации интерферограмм и развертывания фазы. Исследовались следующие алгоритмы фильтрации фазового шума: алгоритмы простого усреднения с адаптивным подбором размера окна (Boxcar), адаптивный пространственный фильтр (Adaptive window) и алгоритм Гольдштейна фильтрации в частотной области (Goldstein filter). Помимо этого, было выполнено сравнение следующих алгоритмов развертывания фазы: алгоритм минимальной стоимости потока (Minimum Cost Flow) и алгоритм «растущих пикселей» (Region Growing). Для подавления фазового шума использовалось некогерентное накопление сигнала с коэффициентом 2×2 . Преобразование фазы в цифровую модель проводилось с использованием автоматически выделяемых опорных точек, которые также включали в себя предварительно установленные уголкового отражатели [4, 5].

В качестве примера на рисунке 1 представлена геокодированная интерферограмма после процедуры взаимопривязки трех пар изображений.

Последним этапом обработки SAR-сцены после развертывания фазы является построение поля характеристик процесса оседания (вертикальных смещений). Пример построения вертикальных смещений с шагом 0,5 см представлен на рисунке 2.

В соответствии с выбранными участками наблюдений были организованы натурные измерения характеристик процессов оседаний и сдвижений дневной поверхности (абсолютные отметки и скорости) по соответствующим профильным линиям. Выбирались именно те даты измерений, которые непосредственно охватывали период проведения SAR-съемок.

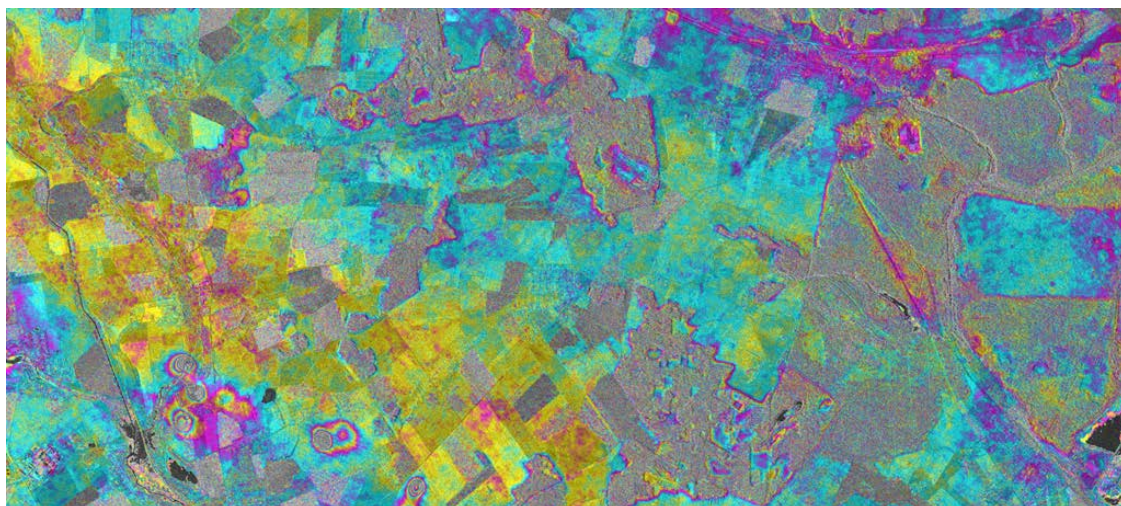


Рисунок 1. – Геокодированная интерферограмма на даты 08.09.2016 и 19.09.2016



**Рисунок 2. – Вертикальные смещения дневной поверхности
после всех процедур обработки SAR-сцен**

3. Натурные измерения по профильным линиям, расположенным на выбранных участках мониторинга

Для сравнения выполненных натурных измерений с результатами SAR-съемки реперные точки профильных линий были вынесены на местность.

1. Лава 19-2 на РУ-4. Линия содержит 10 реперов.

Для указанной линии получены данные для трех дат измерений, которые непосредственно охватывают период проведения SAR-съемки.

2. Лава 11-А на РУ-4. Профильная линия содержит 11 реперов.

По указанной линии выполнены измерения на четыре даты, которые непосредственно охватывали период проведения SAR-съемок.

3. Лава 102 на РУ-1. Профильная линия содержит 27 реперов.

Для указанной линии имеются данные по шести датам измерений, которые непосредственно охватывали период проведения SAR-съемок. Заметим, что местные координаты доступны только для первых 18 реперов, поэтому на местность были вынесены только эти репера, и сравнение в дальнейшем проводилось только по этим точкам. Характерным является также то, что большинство реперов находятся в зоне жилой застройки, и, соответственно, данные по ним могут быть существенно зашумлены.

4. Сравнение данных натурных измерений с результатами обработки SAR-данных

Совмещенные планы горных работ по РУ-3 и РУ-4 по четырем горизонтам и поля оседаний, построенные на основе полученных SAR-данных, приведены на рисунке 3. Здесь календари очистных работ каждого горизонта представлены отдельным цветом: 420-й – синим, 620-й – желтым, 440-й – зеленым, 670-й – красным.



Рисунок 3. – Совмещенные планы горных работ и поля оседаний земной поверхности

Анализ совмещенных картин планов горных работ и поля оседаний показывает, что для всех работающих в интервале проведения съемок лав на слое «поле оседаний» выделяются соответствующие мульды. Для «сдвоенных» лав, фронты которых находятся на близком расстоянии друг от друга (до 300 метров), может формироваться общая мульда (рисунок 4). На рисунке 5 хорошо видно, что для условий «сдвоенные» лавы значение граничного угла мульды оседаний со стороны подработанного пространства изменяется, то есть форма мульды является явно несимметричной.

Сравнение результатов натурных измерений со значениями полей оседаний дневной поверхности, построенными на основе полученных SAR-данных, выполнялось по трем лавам и для трех временных пар. Если даты съемки натурных измерений суще-

ственно отличались от дат интерферометрической съемки, выполнялась оценка величин оседаний, исходя из средней скорости оседаний за весь период наблюдений.



Рисунок 4. – Общая мульда двойных лав

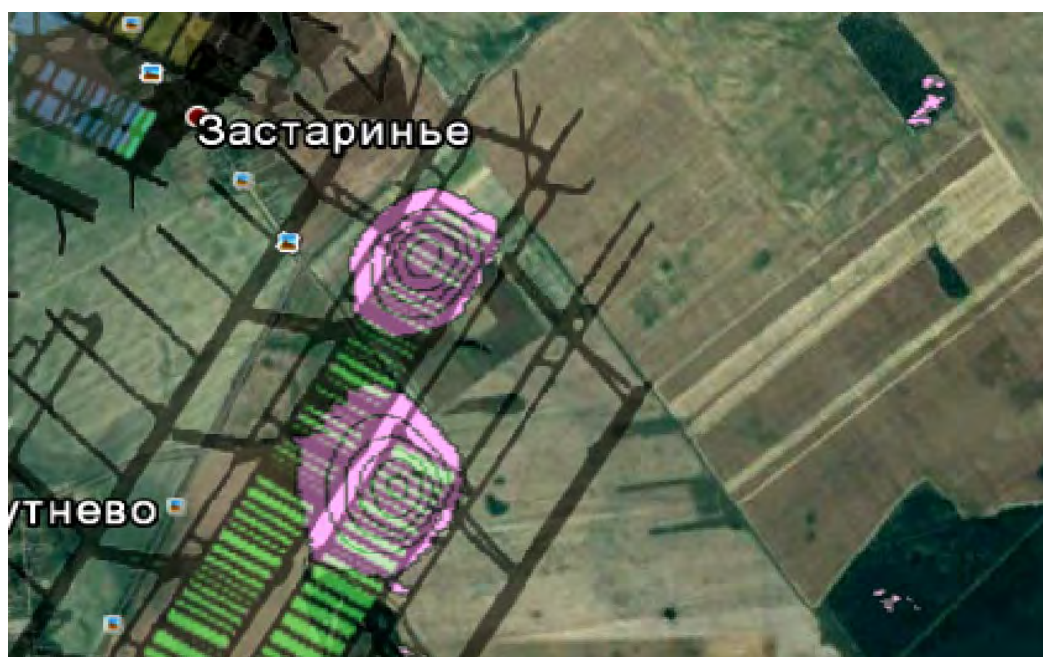


Рисунок 5. – Изменение граничного угла

Примеры сравнения результатов измерений приведены в таблицах 1-3. В таблицах опущены данные по реперам, находящимся на значительных расстояниях от наблюдаемых мульд. Для каждой таблицы приводится графический план мульды, построенной на заданную пару дат с вынесенными на план реперами соответствующей профильной линии (рисунки 6-8).

Таблица 1. – Сравнение оседаний по лаве 102 на период 28.08-19.09

Репер	25.08.2016		22.09.2016		25.08-22.09	28.08-19.09
	отметка, м	скорость оседаний, мм/сут	отметка, м	скорость оседаний, мм/сут	явные оседания, мм	INSAR оседания
11	145,579	1,71	145,544	0,43	35	< 20
12	147,626	0,57	147,605	–0,50	21	< 20
13	147,569	7,00	147,49	2,62	70	45
14	149,046	4,14	148,972	2,00	74	50
15	148,404	4,86	148,344	2,12	60	30
16	147,068	11,71	146,904	5,38	164	65
17	148,483	14,67	148,236	8,25	247	90
18	149,411	6,83	149,277	5,00	134	70



Рисунок 6. – Мульда оседаний по лаве 102, построенная по SAR-данным (на период 28.08-19.09)

Таблица 2. – Сравнение оседаний по лаве 11-А на период 28.08-19.09

Репер	01.09.2016		19.09.2016		01.09-19.09	28.08-19.09
	отметка, м	скорость оседания, мм/сут	отметка, м	скорость оседания, мм/сут	оседания, мм	SAR оседания, мм
1	144,341	–0,12	144,33	0,61	11	< 20
2	144,453	0,76	144,44	0,72	13	< 20
3	144,443	2,76	144,395	2,67	48	20
4	144,261	7,12	144,111	8,33	150	35
5	145,287	8,59	145,043	13,56	283	45
6	145,55	4,18	145,381	9,39	169	35
7	145,873	0,95	145,81	2,56	63	30

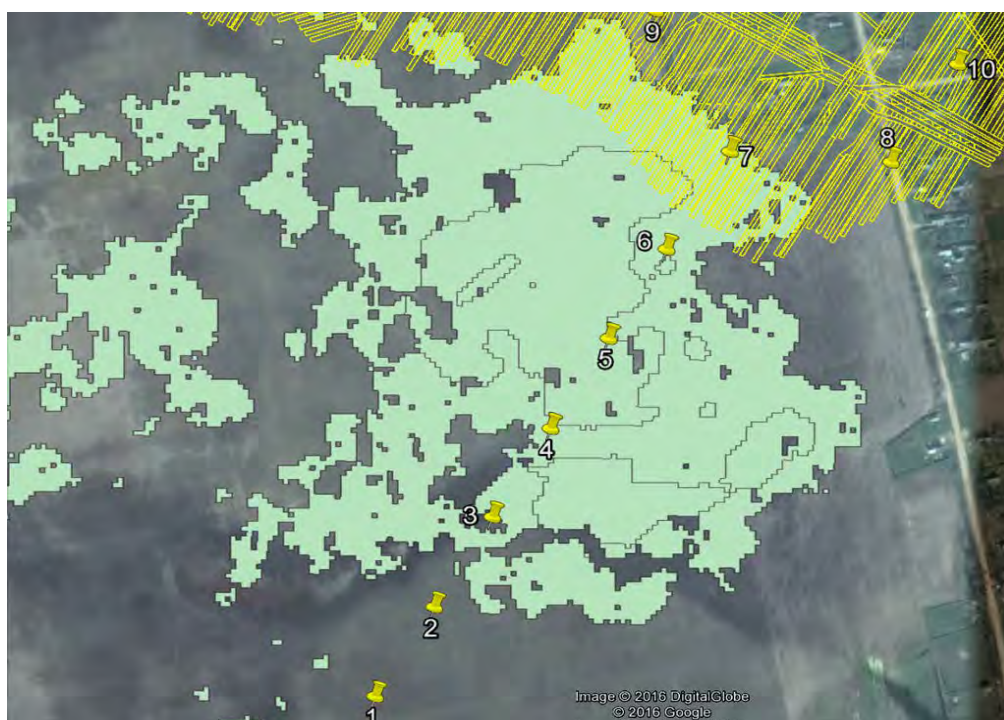


Рисунок 7. – Мульда оседаний по лаве 11-А, построенная по SAR-данным (на период 28.08-19.09)

Таблица 3. – Сравнение оседаний по лаве 19-2 на период 08.09-19.09

Репер	16.08.2016		21.09.2016		16.08-5.09	08.09-19.09
	отметка, м	скорость оседания, мм/сут	отметка, м	скорость оседания, мм/сут	оседания, мм	SAR оседания, мм
1	145,874	0,40	145,868	0,31		
2	147,956	0,65	147,953	0,13		
3	147,609	0,75	147,6	0,31		
4	148,145	1,10	148,141	0,25		
5	146,008	1,15	145,993	0,62	15	< 20
6	145,822	2,00	145,79	0,88	32	< 20
7	145,865	4,75	145,779	2,19	66	35
8	145,97	8,35	145,768	5,12	202	40
9	146,948	7,05	146,671	7,69	277	40
10	146,604	2,75	146,427	6,13	181	40

5. Использование результатов INSAR-измерений для мониторинга инженерных сооружений в районе ведения горных работ

Построенные поля оседания земной поверхности на основе обработки INSAR-данных в районах крупномасштабного ведения подземных горных работ позволяют выполнять контроль состояния участков дневной поверхности и наземных инженерных сооружений (солеотвалы, крупные здания с плоскими крышами, конвейеры и т.п.).

Анализ картин изменения полей оседаний, построенных на интерферометрических парах за периоды 28.08-19.09 и 28.08-08.09, позволяет надежно выделить мульды оседаний, приуроченные к центру промышленной площадки РУ-4.



**Рисунок 8. – Мульда оседаний по лаве 19-2, построенная по SAR-данным
(на период 08.09-19.09)**

Указанные мульды приведены на рисунках 9, 10. Так на рисунке 9 изображен совмещенный крупный план промышленной площадки РУ-4 и двух мульд оседаний (в сантиметровом масштабе), построенных за период 28.08-19.09 и приуроченных к центральной части промышленной площадки.



Рисунок 9. – Оседания на промплощадке РУ-4 за период 28.08-19.09

На этом же рисунке желтыми линиями вынесено околоствольное пространство. Как видно из данного рисунка, мульды находятся на значительных расстояниях от стволов.

Подтверждением эффективности организации мониторинговых наблюдений на основе INSAR-съемки является следующее сообщение белорусских СМИ от 26 октября 2016 года: «Обрушение металлоконструкций на промышленной площадке ОАО «Беларуськалий» привело к остановке подачи руды. Происшествие случилось сегодня в 03:45 на промышленной площадке 4-го рудоуправления ОАО «Беларуськалий». В Министерство чрезвычайных ситуаций поступило сообщение про остановку 1-й и 2-й линий конвейера фабрики отделения и дробления».

Если изучить картины укрупненного совмещенного плана промплощадки и мульд оседаний (рисунок 10), то хорошо видно, что в районе наблюдаемых мульд оседаний находятся несколько конвейеров. То есть наличие таких совмещенных планов и их анализ позволяют оценить реальную ситуацию и принять оперативно необходимые меры по предотвращению опасных последствий.



Рисунок 10. – Укрупненный план промплощадки с мульдами оседаний за период 28.08 - 08.09

6. Поиск мест «непрогнозируемых» оседаний земной поверхности в зонах, прилегающих к шахтному полю РУ-2

На сегодняшний день особой зоной, прилегающей к границе шахтного поля РУ-2, на которой могут происходить «непрогнозируемые» оседания, является Кривичский участок.

Для анализа оседаний на этой территории был проведен специальный анализ результатов комплексной обработки интерферограмм в совокупности с изучением геоло-

гического строения исследуемого участка, данных натурных наблюдений за оседанием на поверхности по реперным линиям и результатов оседаний, полученных на основе обработки SAR-сцен, полученных спутником COSMO-SkyMed.

По результатам обработки интерферограмм Кривичского участка четко установлено, что на севере участка происходят оседания, вызванные движением лавы по 4 слою III калийного горизонта, а на юго-востоке, за пределами распространения III калийного горизонта на крыле мульды по кровле соленосных отложений происходят оседания на участке западнее деревни Краснодворцы. При сопоставлении оседаний, вычисленных при обработке снимков, с результатами, полученными спутником COSMO-SkyMed в октябре 2011 года, видно, что на данном участке также имеются незначительные оседания до 20 мм. Выполняя дополнительно сравнительный анализ оседаний, полученных инструментальными методами, можно сделать вывод, *что центр полученной ранее мульды (юго-восточнее места вскрытого расслопритока) коррелирует с оседаниями, полученными на текущий период с июня по август 2015 г.*

Таким образом, базируясь на данных имеющихся снимков SAR-сцен и выполненном комплексном анализе оседаний на территории Кривичского участка, на последнем можно выделить три зоны, на которых могут иметь место «непрогнозируемые» оседания и которые рекомендуется проверить специальными инструментальными методами (площадной съемкой), а именно:

- 1 – зона западнее деревни Краснодворцы;
- 2 – зона юго-восточнее места вскрытого расслопритока;
- 3 – зона на крыле мульды по кровле соленосных отложений.

Помимо инструментальных методов следует продолжить мониторинг данной территории методами космической радарной интерферометрии, что позволит также получать данные о деформациях не только дневной поверхности, но и сооружений, находящихся на этой территории.

7. Тематическая обработка снимков

Помимо расчета оседаний дневной поверхности с помощью данных интерферометрии можно выполнить тематическую обработку снимков путем создания мультिवременных когерентных композитов и выполнения их интерпретации с использованием специальных ключей.

В качестве примера на рисунках 11 и 12 представлены мультिवременные когерентные композиты участков солеотвалов и шламохранилищ РУ-1 и РУ-3 в масштабе 1:25000. На рисунках хорошо видны изменения, которые происходят на солеотвалах и шламохранилищах. Красному цвету соответствует ситуация, когда объекты присутствуют на первом снимке и отсутствуют на втором, зеленому – объекты отсутствуют на первом снимке и появились на втором, желтому – объекты присутствуют на обоих снимках, но находятся в движении. На снимках видно изменение положения копров на солеотвалах, изменения, происходящие с дамбами и шламохранилищами, четко видна граница намыва соляной плиты.

Заключение

В работе описаны результаты выполненных исследований по изучению эффективности использования результатов SAR-съемки для мониторинга оседаний и сдвижений больших участков земной поверхности, а также деформаций инженерных сооружений в регионе ведения подземных горных работ.

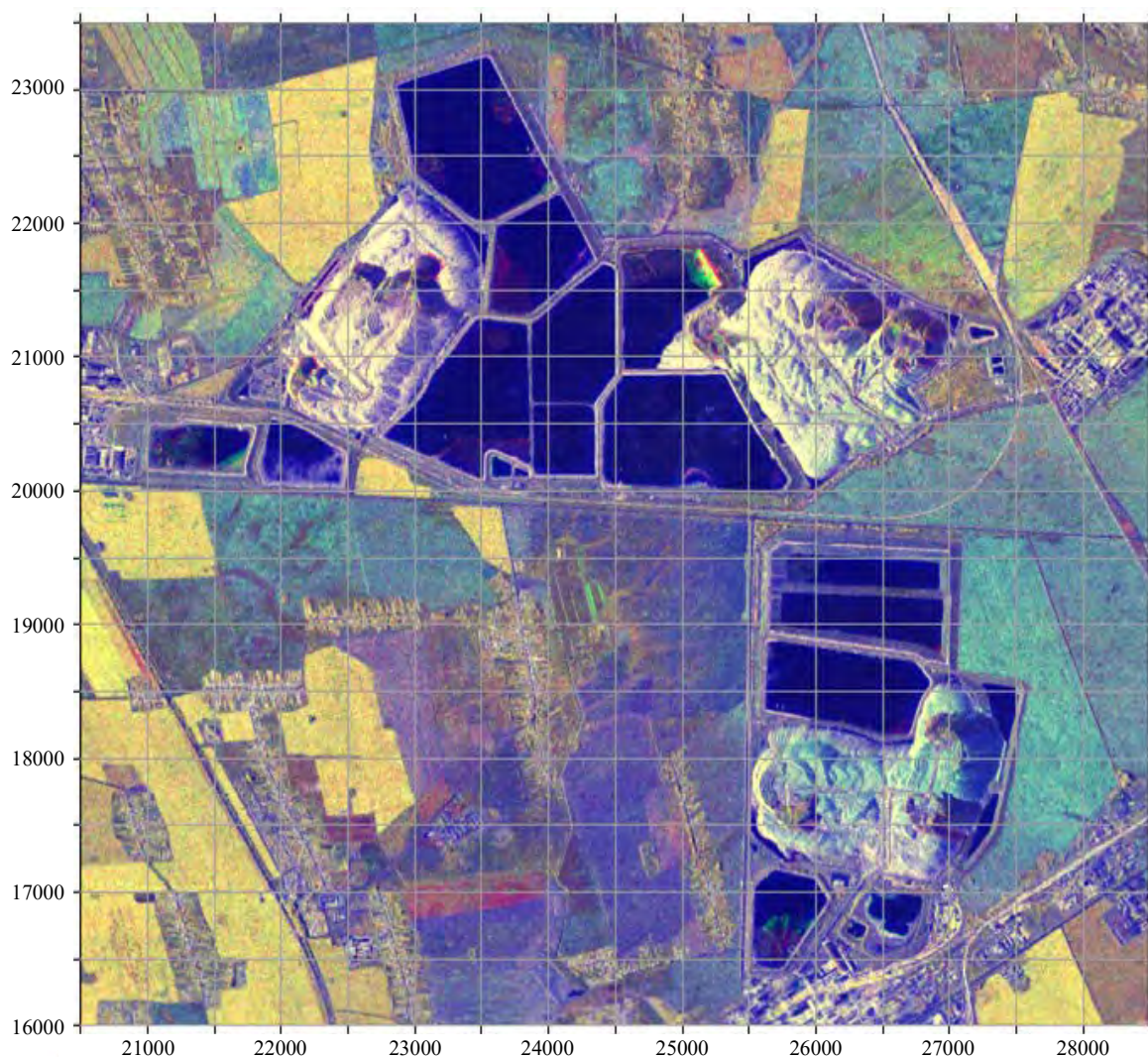


Рисунок 11. – Цветной композит по паре снимков за даты 20.06.2015 и 01.07.2015 г. (11 дней), полученный на размере пикселя 3 на 3 м (система координат – местная). Район РУ-1 – РУ-3

Выполнен анализ точности построения полей вертикальных смещений, который показал, что основной проблемой является существенная дифференциация точности на различных участках мульды оседаний. Во-первых, метод слабоустойчив в краевых зонах влияния подземных горных работ, где средняя скорость оседаний за 11 дней составляет менее 2 мм в сутки. Во-вторых, наблюдаются существенные погрешности в тех областях, где средняя скорость оседаний за 11 дней превышает 4 мм в сутки. Причиной этого является декорреляция интерферограммы в центральной части мульды, которая как раз и обусловлена высокими скоростями оседаний.

В области мульды оседаний, где среднесуточные скорости находятся в пределах 2-4 мм, точность определения оседаний составляет порядка 15 мм за 11 дней, что дает суточную точность в пределах 1,5 мм. Учитывая специфику построения изолиний вертикальных оседаний, указанная область ограничена двумя внешними изолиниями 2 и 4 см.

На основе результатов выполненных исследований подтверждено, что территория Старобинского месторождения калийных солей пригодна для использования технологии спутниковой интерферометрии в качестве элемента системы мониторинга за динамикой оседаний земной поверхности в пределах шахтных полей ОАО «Беларуськалий».



Рисунок 12. – Цветной композит по паре снимков за даты 12.07.2015 и 23.07.2015 г. (11 дней), полученный на размере пикселя 3 на 3 м (система координат – местная). Район РУ-1 – РУ-3

Для организации постоянного мониторинга (контроля) динамики процессов оседаний земной поверхности и сооружений в районах ведения горных работ в пределах шахтных полей ОАО «Беларуськалий» с использованием спутниковой интерферометрии необходимо разработать проект на выполнение постоянной (в течение хотя бы 3-х лет) интерферометрической съемки территории Старобинского месторождения спутниками COSMO-SkyMed или TerraSAR-X в количестве 4-6 раз в месяц с разрешением до 3 м в одной и той же геометрии съемки (предпочтительнее спутник COSMO-SkyMed, так как для него будет возможность увеличения количества съемок до 8 раз в месяц или более при выводе новых спутников на орбиту).

До начала выполнения мониторинга эффективным является построение фактической цифровой модели рельефа территории заказываемой интерферометрической съемки, которая используется в последующем для обработки получаемых снимков. Получение точной цифровой модели рельефа возможно, например, на основе данных спутников сверхвысокого пространственного разрешения TerraSARX и TanDEM-X.

Кроме того, до начала мониторинга следует создать сеть постоянных пунктов наблюдений (около 14 штук или более), равномерно распределенных по участку съемки,

которые бы имели четкую привязку на получаемых космических снимках. По данным пунктам необходимо организовать наблюдения за координатами и абсолютной отметкой. Данные пункты будут использоваться для привязки и обработки получаемых снимков.

Важной составляющей разрабатываемой системы геомеханического мониторинга является возможность контроля состояния инженерных объектов поверхности. Появление мурд оседания в областях, не связанных с подработкой может служить сигналом о возможных опасных техногенных процессах.

Список использованных источников

1. Журавков, М.А. Геомеханический мониторинг горных массивов / М.А. Журавков, О.В. Стагурова, М.А. Ковалева. – Минск: Юникап, 2002. – 252 с.

2. Журавков, М.А. Перспективы и основные направления внедрения автоматизированных геомониторинговых систем в РУП ПО «Беларуськалий» / М.А. Журавков, В.Н. Плескунов, И.С. Невельсон // Современные информационные технологии при добыче полезных ископаемых: материалы науч. практ. семинара-совещания / БГУ; под общ. ред. М.А. Журавкова. – Минск, 2004. – С. 17-31.

3. Журавков, М.А. Актуальные научные проблемы современной геомеханики для условий Республики Беларусь / М.А. Журавков // Механика машин, механизмов и материалов. – 2007. – № 1. – С. 94-99.

4. Технологии мониторинга крупномасштабных процессов деформаций земной поверхности на основе методов дифференциальной спутниковой интерферометрии с использованием активных отражателей. Ч. 1. Теоретические основы спутниковой интерферометрии и подготовки исходных данных для проведения мониторинга / Э.Т. Денкевич [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 1. – С. 5-15.

5. Технологии мониторинга крупномасштабных процессов деформаций земной поверхности на основе методов дифференциальной спутниковой интерферометрии с использованием активных отражателей. Ч. 2. Проведение и анализ экспериментов / Э.Т. Денкевич [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 2. – С. 5-13.

Zhuravkov M.A., Kanavalau A.L., Bogdan S.I., Hvesenya S.S., Denkevich E.T.

Monitoring of the land surface deformations and engineering constructions in the area of mining of Belarus potash salts deposit on the basis of differential satellite interferometry methods with the use of active reflectors

The article describes the results of the performed complex researches of efficiency of differential satellite interferometry methods in order to monitor the surface subsidences and displacements in the area of Starobin deposit of potash salts. The analysis of accuracy of construction of the subsidence troughs on the basis of INSAR-pictures processing is done. It is demonstrated that the territory of Starobin deposit of potash salts is suitable for the use of a satellite interferometry technology as an element of the system of monitoring of land surface subsidences dynamics within the boundaries of Belaruskali's mine field. A possibility to monitor both land surface subsidences and the state of large-scale engineering objects is an important component of geomechanical monitoring.

Keywords: subsidences and displacements of earth surface, monitoring of the mined rock massifs, differential satellite interferometry technologies.

Поступила в редакцию 16.05.2017 г.

УДК 622.232.76:519.87(045)(476)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ПРОЦЕССА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ШНЕКОВОГО БУРЕНИЯ

Казаченко Г.В., Нагорский А.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Ярмолинский В.К. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

Работа посвящена обоснованию рациональных соотношений между конструктивными и режимными параметрами буровых шнековых установок, позволяющих в конкретных геолого-технических условиях обеспечить максимально возможную механическую скорость бурения горизонтальных скважин.

Необходимость проведения данной работы обусловлена существенным отличием взаимодействия разрыхленной горной породы в горизонтальной скважине по сравнению с вертикальной, как с поверхностью скважины, так и со шнеком. Это требует соответствующего уточнения математической модели процесса бурения, что и рассмотрено в предлагаемой статье.

Ключевые слова: шнековое бурение, математическая модель, горизонтальные скважины.

Введение

При пересечении подземными горными выработками геологических нарушений в массиве залежи во избежание газодинамических явлений, согласно регламенту ведения горных работ, требуется предварительное инициирование буровзрывным способом мест возможной концентрации горного давления в зоне нарушения. Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться при шнековом бурении горизонтальных и слабонаклонных (до 25°) взрывных шпуров в пластичных и вязких глинисто-соляных и глинисто-доломитовых породах без продувки воздухом или промывки рассолом – это большая вероятность заштыбовки бурового инструмента мелочью и последующее его неизбежное «заклинивание», приводящее к потере инструмента и шпура. Ликвидация таких аварийных ситуаций требует дополнительных затрат средств и времени, что приводит к снижению производительности, как при бурении «взрывных» шпуров, так и при добыче полезного ископаемого.

Из анализа существующей проблемы [1] следует, что ее разрешение состоит в определении методов рационального выбора регулируемых режимных параметров применяемого бурового оборудования, позволяющих проводить процесс в установившемся режиме, исключая заштыбовку бурового инструмента при максимально допустимой механической скорости бурения. Один из таких методов – это аналитическое исследование рабочего процесса горизонтального шнекового бурения с помощью его математической модели, включающей в себя основные функциональные соотношения между геометрическими, кинематическими, силовыми и энергетическими параметрами буровой установки и физико-механическими свойствами горных пород.

Целью данной работы является формирование математической модели установившегося процесса горизонтального шнекового бурения шпуров и скважин, учитывающей горно-геологические условия бурения, технические возможности применяемого бурового инструмента и оборудования, физико-механические свойства выбуренной горной массы. В основу построения математической модели установившегося процесса горизонтального шнекового бурения положено условие необходимости одновременно-

го соблюдения двух балансовых соотношений: по объему разрушаемой долотом и транспортируемой шнеком из скважины породы, по соответствию установленной мощности буровой установки затратам мощности на выполнение всех операций проходки горизонтальной скважины.

Моделирование установившегося процесса горизонтального шнекового бурения по условию баланса производительности

Схема взаимодействия шнековой бурильной колонны с массивом горной породы при проходке горизонтальной скважины, соответственно в ее продольном и поперечном сечениях, представлена на рисунках 1а, 1б. Установившийся процесс бурения представляет собой непрерывное срезание стружки долотом 1 с поверхности массива горной породы на забое скважины и одновременное транспортирование разрыхленной горной массы винтовой спиралью 3 шнекового става 2 от забоя к устью скважины.

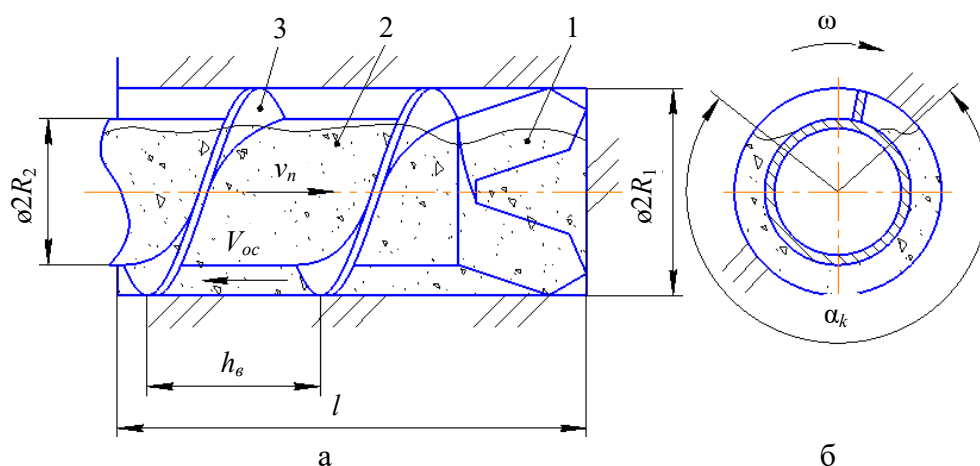


Рисунок 1. – Расчетная схема процесса горизонтального шнекового бурения

Непрерывное бурение с некоторой установившейся механической скоростью проходки скважины может быть обеспечено при выполнении, как минимум, двух условий [2]: первое – достаточная мощность приводов вращателя и механизма подачи буровой установки, второе – достаточная производительность шнекового става по транспортируемому объему разрыхленной горной массы. Последнее из двух названных условий записывается в виде:

$$Q_{ш} = Q_{\partial}, \quad (1)$$

где $Q_{ш}$ – транспортная производительность шнека по объему горной массы;

Q_{∂} – производительность долота по экскавируемой горной породе в том же исчислении.

Объемная производительность долота по экскавируемой горной породе в установившемся режиме бурения определяется:

$$Q_{\partial} = \pi R_1^2 v_n, \quad (2)$$

где R_1 – радиус скважины, который приближенно может быть принятым равным внешнему радиусу винтовой спирали 3 шнекового става (рисунок 1а);

v_n – установившееся значение скорости подачи бурового инструмента на забой скважины.

Если моделировать транспортное перемещение разрыхленной горной массы из скважины как поступательное ее движение вдоль оси вращающегося шнека, то установившуюся транспортную производительность шнека в пересчете на объем горной породы в массиве залежи можно выразить следующим образом:

$$Q_u = \frac{k_v}{k_p} \pi (R_1^2 - R_2^2) (v_{oc} - v_n), \quad (3)$$

где k_v – коэффициент заполнения объема рабочего пространства шнека измельченной породой;

k_p – коэффициент разрыхления горной породы;

R_2 – наружный радиус ступицы шнека;

v_{oc} – осевая скорость перемещения породы относительно буровой колонны;

$(v_{oc} - v_n)$ – установившееся значение скорости перемещения горной массы в скважине.

Скорость v_{oc} может быть выражена как поступательная скорость перемещения горной массы относительно вращающегося шнека:

$$v_{oc} = h_g \frac{\omega}{2\pi} k_\omega, \quad (4)$$

где h_g – шаг направляющей винтовой линии спирали шнека;

ω – угловая скорость вращения буровой колонны;

k_ω – коэффициент циркуляции, учитывающий транспортные потери в виде пересыпания (циркуляции) некоторой части горной массы в межвитковом пространстве шнека.

После подстановки выражений (2)-(4) в соотношение (1) из последнего может быть определено требование к скорости вращения буровой колонны ω , обеспечивающей баланс производительности по экскавации и выносу горной породы из скважины:

$$\omega \geq \frac{2\pi v_n [R_1^2 k_p + (R_1^2 - R_2^2)]}{h_g k_v k_\omega (R_1^2 - R_2^2)}. \quad (5)$$

Коэффициент заполнения межвиткового пространства горизонтально расположенного шнека измельченной породой может быть выражен через отношение площадей:

$$k_v = \frac{S_n}{S_u} = \frac{\alpha_k}{2\pi}, \quad (6)$$

где S_n – площадь сектора в нормальном сечении скважины, занимаемого транспортируемой горной массой, $S_n = \frac{\alpha_k}{2} (R_1^2 - R_2^2)$;

α_k – угол этого сектора (рисунок 1б);

S_u – площадь кругового кольца в нормальном сечении скважины, занимаемого винтовой спиралью шнека, $S_u = \pi (R_1^2 - R_2^2)$.

Баланс производительности по разрушенной долотом горной породе и транспортируемой шнеком горной массе с учетом (6) записывается в виде:

$$k_p \pi R_1^2 v_n = \frac{\alpha_k k_\omega}{2\pi} \pi (R_1^2 - R_2^2) (v_{oc} - v_n), \quad (7)$$

откуда значение угла сектора, занимаемого измельченной горной массой в установившемся режиме бурения:

$$\alpha_k = \frac{2\pi k_p R_1^2 v_n}{k_\omega (R_1^2 - R_2^2) (v_{oc} - v_n)}. \quad (8)$$

Моделирование установившегося процесса горизонтального шнекового бурения по условию энергетического баланса

Установленная мощность приводов вращателя и механизма подачи бурового станка N_{ycm} , обеспечивающих установившийся процесс бурения с известной минимальной скоростью вращения буровой колонны (5) и предельно допустимой механической скоростью бурения из условия (1), для некоторого заданного интервала бурения должна отвечать требованию

$$N_{ycm} \geq N_p + N_n + N_m + N_\delta, \quad (9)$$

где N_p – затраты мощности привода вращателя на разрушение горной породы долотом;

N_n – затраты мощности привода механизма подачи на подачу бурового инструмента на забой скважины;

N_m – затраты мощности привода вращателя на транспортирование шнеком измельченной горной массы из скважины;

N_δ – затраты мощности привода вращателя на преодоление шнеком сопротивления породы движению, связанные с изменением во времени ее массы и количества движения.

Затраты мощности на разрушение горных пород долотом при вращательном бурении [1]:

$$N_p = e_p Q = \pi R_1^2 k_1 c_1 \left(\frac{2\pi v_n}{\omega z} \right)^{c_2} \cdot v_n, \quad (10)$$

где e_p – удельные затраты мощности на разрушение массива горной породы резанием,

$$e_p = k_1 c_1 \left(\frac{2\pi v_n}{\omega z} \right)^{c_2};$$

c_1 – коэффициент, характеризующий прочностные свойства массива;

k_1 – коэффициент, учитывающий изменение напряженно-деформированного состояния породного массива по сравнению с эталонным образцом, с помощью которого определен коэффициент c_1 ;

$2\pi v_n / \omega z$ – толщина стружки, снимаемой режущими элементами долота;

z – среднее число резцов в линиях резания режущих элементов;

c_2 – показатель степени, характеризующий интенсивность влияния толщины срезаемой стружки на удельные затраты мощности при вращательном бурении.

Затраты мощности на подачу долота на забой:

$$N_n = P_n v_n, \quad (11)$$

где P_n – осевая сила сопротивления массива горной породы подаче долота на забой скважины.

В первом приближении эта сила может быть принята пропорциональной приведенной равнодействующей сил сопротивления резанию P_p , которая определяется из соотношения:

$$P_p = \frac{N_p}{\omega r_p}, \quad (12)$$

где r_p – плечо приведенной равнодействующей сил сопротивления резанию горной породы многолезвийным долотом.

В соответствии с методикой [3] величина радиуса, на котором приложена приведенная равнодействующая сил сопротивления резанию породы многолезвийным долотом

$$r_p = \frac{R_1}{\sqrt{2}}. \quad (13)$$

Осевая сила сопротивления массива горной породы подаче долота на забой с учетом (12) и (13)

$$P_n = k_n P_p = \frac{\sqrt{2} k_n}{R_1} \cdot \frac{N_p}{\omega}, \quad (14)$$

где k_n – коэффициент пропорциональности между силами сопротивления резанию и сопротивления подаче.

В итоге затраты мощности на подачу долота на забой моделируются комплексом:

$$N_n = \sqrt{2} \pi R_1 k_n k_1 c_1 \left(\frac{2 \pi v_n}{\omega z} \right)^{c_2} \cdot \frac{v_n^2}{\omega}. \quad (15)$$

Необходимо отметить, что определяемая по формуле (12) приведенная равнодействующая сил сопротивления резанию является некоторой условной силой, которая равна действию распределенных по забою скважины сил сопротивления резанию отдельных режущих элементов.

Затраты мощности привода вращателя на преодоление сил трения между шнеком и горной массой, а также горной массой и стенкой скважины в установившемся режиме:

$$N_m = M_{mp} \omega + F_{mp} (v_{oc} - v_n), \quad (16)$$

где M_{mp} – суммарный момент элементарных сил трения частиц измельченной породы о поверхность спирали вращающегося шнека;

F_{mp} – сила трения транспортируемой шнеком горной массы о стенку скважины.

С целью определения значений момента M_{mp} рассмотрим поперечное сечение транспортирующей части буровой колонны (рисунок 2). Обозначив величину давления транспортируемого материала на поверхность спирали шнека p , суммарный момент трения M_{mp} можно представить в виде:

$$M_{mp} = n \iint_{S_e} f p r dS_e, \quad (17)$$

где n – текущее число витков спирали, участвующих в транспортировании горной массы;
 f – коэффициент трения между транспортируемой горной массой и спиралью шнека;

r – радиус окружности в нормальном сечении скважины, характеризующий удаление точки на поверхности спирали шнека от оси вращения шнека;

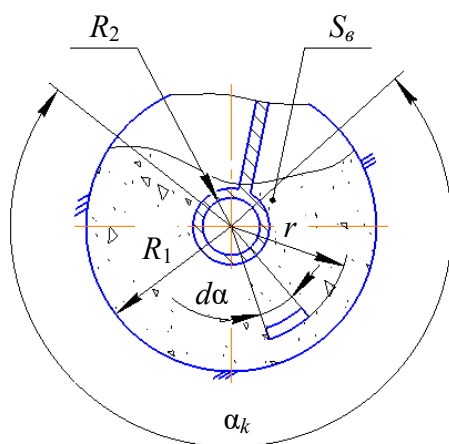


Рисунок 2. – К определению момента трения горной массы о винтовую поверхность спирали шнека

dS_g – дифференциал площади элементарной площадки винтовой поверхности спирали, контактирующей с горной массой.

Приняв с небольшой погрешностью, что площадь одного витка поверхности спирали шнека практически не отличается от площади нормального сечения скважины, т.е. $S_g = S_{ш}$, выразим дифференциал площади элементарной площадки поверхности спирали в полярных координатах:

$$dS_g = dS_{ш} = r d\alpha dr. \quad (18)$$

Далее выражение (17) с учетом (18) запишем следующим образом:

$$M_{mp} = n \int_0^{\alpha_k} \int_{R_2}^{R_1} f p r^2 d\alpha dr, \quad (19)$$

где α_k – угол контакта (8) горной массы со стенкой скважины в ее нормальном сечении.

Считая значения коэффициента трения f транспортируемой горной массы по поверхности спирали шнека и ее давления p на эту поверхность постоянными, из (19) получим:

$$M_{mp} = \frac{fp(R_1^3 - R_2^3)}{3} \alpha_k n. \quad (20)$$

Следует отметить, что величина давления p не зависит от величины шага h_g направляющей винтовой линии транспортирующей поверхности и от угла наклона последней к оси колонны, и с учетом (18) может быть определена по формуле:

$$p = \frac{P_{oc}}{nS_g}, \quad (21)$$

где P_{oc} – текущее значение общей осевой силы сопротивления перемещению горной массы в скважине, изменяющееся по мере углубления скважины:

$$P_{oc} = F_{mp} = f_1 m_n g, \quad (22)$$

где f_1 – коэффициент трения транспортируемой горной массы о стенку скважины;
 m_n – текущее значение массы транспортируемой породы:

$$m_n = k_p \rho \frac{Q_d l}{v_{oc} - v_n} = k_p \rho \pi R_1^2 \frac{l \cdot v_n}{v_{oc} - v_n}, \quad (23)$$

где ρ – плотность горной массы;

l – текущая длина скважины (рисунок 1а);

S_g – часть площади винтовой поверхности спирали шнека, контактирующей с передвигаемой в скважине горной массой (рисунок 2), которая может быть определена из баланса производительности долота и шнека:

$$\pi R_1^2 v_n k_p = S_\epsilon (v_{oc} - v_n) k_\omega. \quad (24)$$

Откуда

$$S_\epsilon = \frac{\pi k_p R_1^2 v_n}{k_\omega (v_{oc} - v_n)}. \quad (25)$$

После подстановки (23) в (22) получим:

$$P_{oc} = f_1 k_p \rho \pi R_1^2 g \frac{l \cdot v_n}{v_{oc} - v_n}. \quad (26)$$

Давление p со стороны горной массы на поверхность винтовой спирали шнека с учетом соотношений (25), (26):

$$p = f_1 \rho g \frac{l}{n}. \quad (27)$$

Подставив далее значение (27) в (20), получим:

$$M_{mp} = \frac{f f_1 \rho g (R_1^3 - R_2^3)}{3} l \alpha_k. \quad (28)$$

В итоге затраты мощности вращателя буровой установки на транспортирование горной массы в соответствии с (16) и учетом (23) и (8):

$$N_m = f_1 k_p \rho \pi R_1^2 g \left[\frac{2f(R_1^3 - R_2^3)}{3(R_1^2 - R_2^2)} \omega + 1 \right] \cdot \frac{l \cdot v_n}{v_{oc} - v_n}. \quad (29)$$

При моделировании процесса шнекового бурения необходимо учитывать величину составляющей затрат мощности вращателя буровой установки, присутствие которой обусловлено изменением во времени массы и количества движения транспортируемой шнеком породы. В соответствии с теоремой об изменении количества движения, импульс силы, приложенной к горной массе со стороны шнека за некоторый промежуток времени:

$$R_{oc} \cdot dt = d(m_n v), \quad (30)$$

где v – абсолютная скорость транспортирования горной массы, $v = v_{oc} - v_n$;

R_{oc} – составляющая равнодействующей осевой силы, действующая на горную массу со стороны спирали шнека, вызванная постоянным увеличением массы породы.

В установившемся режиме бурения $v = \text{const}$, поэтому (30) приводится к виду:

$$R_{oc} = \frac{dm_n}{dt} v. \quad (31)$$

Так, как

$$\frac{dm_n}{dt} = \rho Q_o, \quad (32)$$

зависимость составляющей осевой силы сопротивления перемещению горной массы в скважине, обусловленная увеличением ее массы во времени, принимает вид:

$$R_{oc} = \rho Q_o v. \quad (33)$$

В итоге дополнительные затраты мощности привода вращателя, обусловленные изменением массы транспортируемой шнеком породы:

$$N_o = R_{oc} \cdot v = \rho Q_o (v_{oc} - v_n)^2. \quad (34)$$

Заключение

Сформированы основные функциональные соотношения между геометрическими, кинематическими, силовыми и энергетическими параметрами буровой установки и физико-механическими свойствами горных пород. Полученные соотношения позволяют моделировать установившиеся процессы бурения горизонтальных шпуров и скважин, актуальность исследования которых вызвана необходимостью решения упомянутых выше неотложных задач практики. С помощью созданной модели представляется возможность разработки алгоритмов и номограмм для выбора оптимальных режимных параметров существующего бурового оборудования, позволяющих в практике бурения обеспечить максимальную механическую скорость проходки горизонтальных горных выработок, гарантированно исключая осложнения и аварийные ситуации. Нам представляется перспективным использование предложенного метода моделирования установившихся процессов шнекового бурения для оптимизации конструктивных параметров бурового инструмента и разработки систем автоматического регулирования режимных параметров шнековых буровых установок.

Список использованных источников

1. **Казаченко, Г.В.** Исследование процесса шнекового бурения. Часть 1. Формирование математической модели рабочего процесса в установившемся режиме бурения / Г.В. Казаченко, А.В. Нагорский, Г.А. Басалай // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 65-74.
2. Исследование процесса шнекового бурения. Часть 2. Производительность и методика расчета ее характеристик / Г.В. Казаченко [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 53-60.
3. **Казаченко, Г.В.** Число резцов в линии резания и неравномерность силы резания / Г.В. Казаченко // Горная механика. – 2007. – № 3. – С. 45-50.

Kazachenko G.V., Nagorsky A.V., Yarmolinsky V.K.

Mathematical model of the steady process of horizontal auger drilling

The work is devoted to demonstration of rational relationships between design and operating parameters of drilling augers, which, in specific geological and technical conditions, provide the maximum possible mechanical speed of drilling horizontal wells.

The reasoning of the work is based on the essential difference between the interaction of the loosened rock in a horizontal well compared to a vertical one, both with the top of the well and with the auger. This requires a corresponding refinement of the mathematical model of the drilling process and this is discussed in the article.

Keywords: auger drilling, mathematical model, horizontal wells.

Поступила в редакцию 25.07.2017 г.

УДК 622.834.2(045)(476)

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОВТОРНОЙ ПОДРАБОТКЕ

Кологривко А.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Голдаев А.В., Голдаев В.А. (ОАО «Шахтоспецстрой», г. Солигорск, Беларусь)

Представлен анализ и оценка результатов инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности при повторной подработке в процессе эксплуатации шахт Львовско-Волынского каменноугольного бассейна. Характеризованы особенности распределения величин оседаний земной поверхности в результате повторной подработки и даны рекомендации для адаптации известных методик расчета к условиям повторной подработки. Изложены предпосылки к уточнению действующих методик расчета и прогнозирования максимальных оседаний земной поверхности в условиях повторной подработки.

Ключевые слова: оседания земной поверхности, повторная подработка, прогноз оседаний, методика расчета прогнозируемых оседаний.

Введение

По территориальной принадлежности, особенностям геологической структуры и угленосности, степени разведанности и промышленного освоения общая площадь Львовско-Волынского каменноугольного бассейна (далее – бассейн) разделена на три района – Нововолынский, Червоноградский и Юго-Западный. Червоноградский геолого-промышленный район занимает центральную часть бассейна и на северо-востоке граничит с Нововолынским районом. Восточная и южная его границы проходят по полосе нижневизейских известняков, юго-западная – вдоль Великомостовского надвига, который переходит на юго-востоке в Каменка-Бугскую тектоническую зону. Район является основным в бассейне. В его пределах сосредоточено 70-90 % всех балансовых запасов угля, более половины действующих шахт и все подготовленные для дальнейшего промышленного освоения шахтные участки. Основное промышленное значение имеют и разрабатываются шахтами ГП «Львовуголь» угольные пласты n_7^H , n_7 , n_7^6 , n_8 , n_8^6 , n_9 . Максимальная угленосность приурочена к южной части района. В направлении на север угленосность падает вследствие сокращения рабочих угольных пластов и их мощности. Некоторое промышленное значение приобретает пласт v_6 , который залегает ниже пласта n_7^H на 250 м.

Отработка угольных запасов в условиях бассейна связана с необходимостью охраны от вредного влияния горных работ значительного количества объектов земной поверхности, попадающих в зону подработки. К таким объектам относятся населенные пункты (города Червоноград, Сосновка, Нововолынь), промышленные объекты (Червоноградские заводы железобетонных изделий и металлоконструкций, объекты Червоноградской центральной обогатительной фабрики), инфраструктурные объекты (железная дорога Ковель-Львов с мостами через реки Солокия и Рата, магистральные водопроводы, газопроводы большого, среднего и низкого давления, отделенные каркасные здания и автомобильные мосты), сельскохозяйственные угодья и лесные массивы. В последнее время в бассейне получила распространение практика частичной выемки запасов угля в пределах охранных целиков.

В настоящее время прогноз оседаний земной поверхности в условиях бассейна осуществляется по методике, регламентированной Правилами [1]. Исходные параметры, положенные в основу методики прогнозирования процессов сдвижений и деформаций, были определены в начальный период освоения бассейна по аналогии с другими месторождениями. Период характеризовался, с одной стороны – отсутствием достаточного количества фактических данных маркшейдерских наблюдений за процессом сдвижения, с другой – ведением горных работ в условиях первичной подработки [2-6].

К настоящему времени условия подработки земной поверхности значительно изменились [7, 8]. На шахтах бассейна долгое время ведутся работы на нескольких горизонтах и в условиях повторной подработки. Фиксируются неоднократные случаи отклонения фактических значений деформации земной поверхности от ожидаемых. На протяжении 25 лет силами специализированной организации – Червоноградского бюро специализированных маркшейдерских работ (ЧБСМР) – ведутся регулярные наблюдения за процессом подработки наиболее важных объектов, позволяющие контролировать их состояние на земной поверхности в процессе подработки, с целью своевременного принятия мер в случае появления опасных деформаций [9-19].

Прослеживающиеся расхождения в ожидаемых параметрах процесса сдвижения пород и деформаций земной поверхности в процессе эксплуатации шахт бассейна требуют повышения точности прогнозирования параметров развития деформационных процессов при повторной подработке.

Особенности методики прогноза оседаний земной поверхности

Анализ горно-геологических и горнотехнических условий разработки, принимая во внимание изучение и обобщение практического опыта в части технологии и механизации разработки угольных пластов, позволяет характеризовать бассейн следующими горно-геологическими условиями, влияющими на процесс сдвижения [20]: угол падения пластов от $0-3^\circ$ на большей территории до $5-7^\circ$ на локальных участках; кратность подработки $H/m = 220 - 600$ (H – глубина разработки, m – вынимаемая мощность пласта); угол падения пласта в пределах очистной выработки не меняется более чем на 8° ; наиболее распространенная форма очистных выработок – прямоугольная, стороны выработок параллельны элементам залегания пласта, однако в отдельных случаях, очистные выработки могут иметь сложную форму; управление кровлей – полное обрушение; наличие разрывных и пликативных геологических нарушений в пределах зоны влияния горных работ.

В сложившихся условиях прогноз оседаний земной поверхности может осуществляться расчетом ожидаемых оседаний (в случаях, когда известен календарный план развития горных работ) и расчетом вероятных оседаний (в случаях, когда не известен календарный план развития горных работ).

При расчете ожидаемых оседаний земной поверхности в пределах зоны влияния очистных работ определяют оседание в любой точке мульды сдвижения η , максимальное оседание земной поверхности η_m , значение функции типовой кривой.

Оседания в любой точке мульды сдвижения η определяют по формуле:

$$\eta = \eta_m \cdot S(z_x) \cdot S(z_y), \quad (1)$$

где η_m – максимальное оседание земной поверхности, м;

$S(z_x)$ и $S(z_y)$ – функция типовой кривой оседания, определяемая в зависимости от коэффициентов N_1 (для точек главного сечения мульды вкост простирания пласта) и N_2 (для точек главного сечения мульды по простиранию пласта).

Максимальное оседание земной поверхности η_m определяют по формуле:

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \quad (2)$$

где q_0 – относительная величина максимального оседания, безразмерная величина (в условиях бассейна: для первичной подработки – 0,8, для повторной – 0,9);

α – угол падения пласта в пределах очистной выработки, градус;

N_1 и N_2 – условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности, соответственно, вкрест простирания и по простиранию пласта.

Коэффициенты N_1 и N_2 в условиях бассейна, определяются по формулам:

$$N_1 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_1}{H} + \Delta D_n + \Delta D_e \right)}; \quad (3)$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_2}{H} + \Delta D_{np} + \Delta D_{onp} \right)}, \quad (4)$$

где D_1 и D_2 – длины очистной выработки, соответственно, вкрест простирания и по простиранию пласта, м;

H – средняя глубина разработки, м;

$\Delta D_n, \Delta D_e, \Delta D_{np}, \Delta D_{onp}$ – поправки к относительной длине лавы, соответственно, по падению, по восстанию, по простиранию, обратно простиранию пласта (для условий бассейна поправки определяются как $0,1 - 0,25 \cdot l/H$, здесь l – размер целика в соответствующем направлении).

Если поправка к относительной длине лавы меньше $-0,10$, то ее принимают равной $-0,10$. Если значения коэффициентов N_1 и N_2 больше 1,0, то их принимают равными 1,0; если меньше 0,20, то их принимают равными 0,20 [1].

Значения функции типовой кривой оседания $S(z)$ для условий бассейна получены эмпирическим путем (рисунок 1).

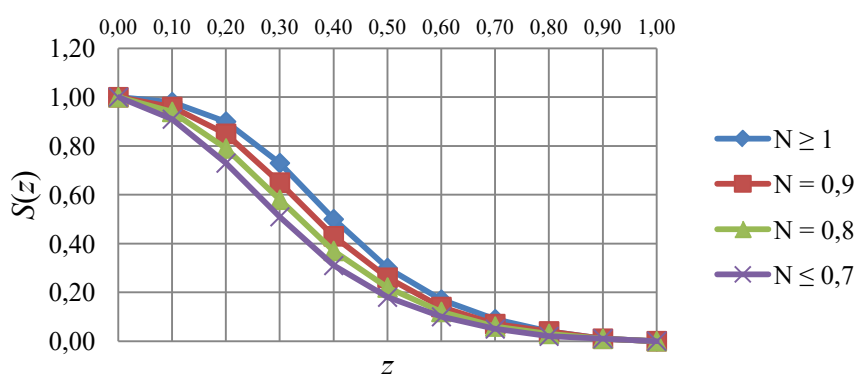


Рисунок 1. – График функции типовой кривой оседания $S(z)$

Влияние величины максимального оседания земной поверхности η_m и функции типовой кривой $S(z)$ на расчетное значение оседания в произвольной точке различаются в пределах мульды сдвижения. Так, в центральной части мульды сдвижения решающее значение имеет величина максимального оседания η_m . От центра к границам мульды сдвижения влияние функции типовой кривой оседания $S(z)$ возрастает. Наибольшее

влияние функции проявляется в интервале $S(0,2...0,8)$. На границе мульды сдвижения влияние обоих факторов минимально.

Расчет вероятных оседаний земной поверхности η в пределах зоны влияния очистных работ определяется по формуле:

$$\eta = 0,9 \cdot (m_1 + m_2 + \dots + m_n) \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

где $m_1 + m_2 + \dots + m_n$ – мощности пластов, м.

Расчетные значения оседаний – ожидаемые или вероятные оседания, увеличенные на существующий уровень погрешности применяемого расчетного метода при помощи коэффициента перегрузки. Согласно пункту А.2.9 [1], значение коэффициента перегрузки $n = 1,2$. Расчетными оседаниями пользуются при решении вопроса о применении мер защиты зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных работ.

Результаты маркшейдерских наблюдений за подрабатываемыми объектами

Процесс сдвижения земной поверхности над очистными выработками шахт бассейна не является исключением в части наличия закономерностей, проявляющихся во всех наблюдаемых случаях, подтверждаемых результатами многолетних производственных маркшейдерских инструментальных наблюдений за поверхностью. Так, с целью уточнения закономерностей для условий повторной подработки проведен анализ наблюдений за 536 реперами 10 специальных наблюдательных станций, состоящих из 20 профильных линий (таблица 1). Вынимаемые мощности пластов в анализируемых условиях составляли от 0,6 до 1,7 м, коэффициент, характеризующий степень подработанности земной поверхности, изменялся от 0,23 до 1,00 согласно [1].

На рисунке 2, в качестве примера, представлен график соответствий величин оседаний при подработке дамбы хвостохранилища № 1 Червоноградской центральной обогатительной фабрики лавами № 188, 189, 190 по наблюдательной станции 10 «Дамба ЦОФ» линии № 1 шахты «Межиречанская». В 2013 году для наблюдения за деформациями дамбы хвостохранилища заложена специальная наблюдательная станция, состоящая из 1 линии (65 реперов) в пределах зоны влияния. Интервал между реперами составляет 20 ± 2 м. Наблюдения проводились с 2013 по 2015 года с интервалами 1-2 месяца. Линия № 1 находится в центрально-краевой части мульды сдвижения в зоне повторной подработки, где наблюдается значительное превышение ожидаемых оседаний над фактическими.

Коэффициент перегрузки $n = 1,2$, необходимый для компенсации погрешности методики вычисления ожидаемых или вероятных значений оседаний, в реальных условиях представляется завышенным. Для подтверждения этому, приведем следующие примеры.

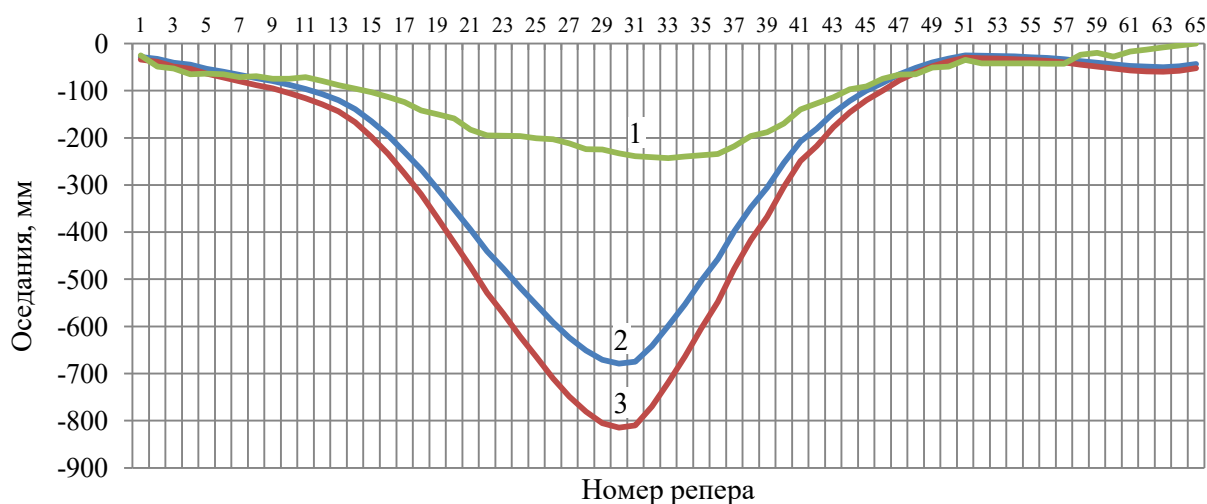
Определим вероятную величину оседаний η^o при отработке пласта мощностью $m = 1,0$ м и угле падения $\alpha = 0^\circ$. По формуле (5) получаем: $\eta^o = 0,9 \cdot 1,0 \cdot \cos 0^\circ = 0,9$ м.

Тогда расчетная величина оседаний составит: $\eta^p = n \cdot \eta^o = 1,2 \cdot 0,9 = 1,08$ м.

Определим ожидаемое значение максимального оседания η_m^o при отработке двумя спаренными лавами пласта мощностью $m = 1$ м, угле падения $\alpha = 0^\circ$, глубине разработки $H = 400$ м, с общими размерами выработанного пространства 600×600 м, в условиях повторной подработки $q_0 = 0,9$ и отсутствии влияния целиков ($\Delta D_n + \Delta D_e = 0$; $\Delta D_{np} + \Delta D_{onp} = 0$).

Таблица 1. – Характеристики наблюдательных станций и обобщенные результаты анализа распределения величин оседаний земной поверхности

Номер наблюдательной станции	Название шахты	Пласт	Номер лавы	Глубина залегания пласта, м	Мощность наносов, м	Количество серий наблюдений	Скорость подвигания лав, м/мес.	Номер линии	Количество реперов	Величины оседания, мм						Отклонения между ожидаемыми и фактическими значениями, %
										ожидаемые		расчетные		фактические		
										средние	максимальные	средние	максимальные	средние	максимальные	
1	Межиреченская	n_8	486, 487, 488, 489, 490	460	10	57	30-50	-	88	733	1282	881	1538	778	1405	-5,3
2	Червоноградская	n_8^6	560, 561	510	10	50	10-30	1 2	15 17	153 497	174 613	184 597	209 735	146 318	201 445	3,2 37,8
3	Червоноградская	n_8	435, 436	490	10	32	30-50	3 5 6	20 24 32	316 390 193	836 613 321	379 468 232	1003 735 385	286 703 155	857 445 283	22,1 13,8 32,9
4	Великомостовская	n_8^6	412, 413, 414, 502	432	10	29	20-60	1 2	37 17	395 177	647 346	474 212	777 415	201 114	394 268	49,0 34,2
5	Заречная	n_7^6	307	493	10	18	10-25	1 2	38 25	246 34	686 110	296 41	823 132	270 32	609 81	-9,8 16,7
6	Межиреченская	n_7^H	185, 186	477	10	15	40-60	1 2 3	60 10 11	176 48 69	590 91 169	211 58 83	708 110 203	25 22 20	249 44 35	70,0 50,3 52,5
7	Великомостовская	n_8	408, 409, 410, 411	415	10	48	5-50	-	40	557	1120	668	1344	494	1174	11,2
8	Великомостовская	n_8	408, 409 410, 411	415	10	34	5-50	1 2 3	8 7 7	693 425 284	836 564 308	832 510 340	1003 677 370	467 334 238	566 428 247	32,6 24,4 29,5
9	Великомостовская	n_7^H	425, 403, 402	428	10	24	30-60	1 2	10 5	294 210	332 224	353 252	398 269	157 104	181 141	46,7 50,4
10	Межиреченская	n_7^H	188, 189, 190	465	10	17	10-60	1	65	223	679	267	815	91	243	49,6



1 – фактические; 2 – ожидаемые; 3 – расчетные

Рисунок 2. – Распределение величин оседаний земной поверхности при подработке дамбы хвостохранилища № 1 ЦОФ лавами № 188, 189, 190 по результатам наблюдений за деформациями на наблюдательной станции № 10 «Дамба ЦОФ» линии № 1 шахты «Межиреченская»

По формулам (2)-(4), принимая во внимание условие, при котором, в случае значения коэффициентов N_1 и N_2 больше 1,0, их принимают равными 1,0, получаем:

$$N_1 = \sqrt{0,9 \left(\frac{600}{400} + 0 \right)} = 1,162;$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \left(\frac{600}{400} + 0 \right)} = 1,162;$$

$$\eta_m^o = 0,9 \cdot 1,0 \cdot \cos 0^\circ \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 0,9.$$

Расчетная величина максимальных оседаний составит:

$$\eta_m^p = n \cdot \eta_m = 1,2 \cdot 0,9 = 1,08 \text{ м.}$$

Как видно из примеров, расчетная величина максимальных оседаний η_m^p превышает вынимаемую мощность пласта m , что является невозможным.

По данным инструментальных наблюдений ожидаемые величины максимального оседания, как правило, не превышают фактических (таблица 1). Исключения зафиксированы лишь на трех линиях (15 % случаев), когда превышения фактических величин над ожидаемыми составили 128 мм (9,6 %), 27 мм (15,5 %), 54 мм (4,8 %), при этом второй результат не является представительным, ввиду его малой величины.

Представляется целесообразным принятие коэффициента перегрузки на уровне значения $n = 1,1$, что позволит увеличить сходимость расчетных и ожидаемых величин максимального оседания на 5,5 %, а также исключить ситуацию, когда расчетная величина максимального оседания превышает вынимаемую мощность.

Во всех случаях наблюдались отклонения ожидаемых η_m^o от фактических η_m^f значений максимальных оседаний. Для оценки точности прогноза значений максимальных оседаний вводим коэффициент точности прогноза величины максимального оседания K_η :

$$K_{\eta} = \frac{\eta_m^{\phi}}{\eta_m^o}, \quad (6)$$

где $K_{\eta} = 1$ – в случае полного совпадения ожидаемых и фактических значений максимальных оседаний;

$K_{\eta} > 1$ – фактические значения максимальных оседаний превысили ожидаемые;

$K_{\eta} < 1$ – фактические значения максимальных оседаний не достигли ожидаемых.

Отклонения ожидаемых от фактических значений максимальных оседаний наиболее представительно ($K_{\eta} = 0,36...0,42$) проявляются в случаях отработки лав малой длины (при погашении целиков выработок главных направлений). С целью установления зависимости между относительным размером выработанного пространства и точностью значений максимальных оседаний выполнен отбор и анализ наблюдательных станций. Главным критерием при отборе наблюдательных станций стало минимальное влияние функции типовой кривой оседания $S(z)$ на величину максимального оседания в профильной линии. Данному критерию соответствуют пять профильных линий, проходящих через центр мульды сдвижения, (таблица 1).

В результате анализа (таблица 2) установлена зависимость между относительным размером выработанного пространства D/H и коэффициентом точности прогноза величины максимального оседания K_{η} (рисунок 3).

Таблица 2. – Значения коэффициента точности прогноза величины максимального оседания K_{η}

Номер станции		1	5	6	7	10
Номер линии		–	1	1	–	1
Максимальные оседания, мм	ожидаемые, η_m^o	1282	686	590	1120	679
	фактические, η_m^{ϕ}	1405	609	249	1174	243
Глубина разработки H , м		466	493	477	417	465
Размер лавы D , м		990	160	110	320	90
Относительный размер выработанного пространства D/H		2,1245	0,3245	0,2306	0,7674	0,1935
Коэффициент точности прогноза величины максимального оседания K_{η}		1,0959	0,8878	0,422	1,0482	0,3579

Наибольшая точность прогноза величины максимального оседания соответствует отношению $D/H \approx 0,5$. При увеличении величины отношения $D/H > 0,5$ существующая методика несколько занижает ожидаемую величину максимального оседания η_m^o , а при уменьшении отношения $D/H < 0,5$ – существенно завышает η_m^o .

Из параметров процесса сдвижения, влияющих на величину максимального оседания при повторной подработке, следует выделить вынимаемую мощность пласта, относительное максимальное оседание и коэффициенты подработанности земной поверхности (2)–(4). Вынимаемая мощность пласта является величиной, определенной по фактическим замерам в забое очистной выработки. Относительное максимальное оседание не может быть больше 1, так как максимальное оседание земной поверхности не может быть больше вынимаемой мощности пласта. Коэффициенты подработанности N_1 и N_2 зависят от глубины разработки и расчетного размера очистной выработки. Таким образом, для более точного прогнозирования величины максимального оседания и адаптации к существующим условиям повторной подработки формула (2) примет вид:

$$\eta_m = K_\eta \cdot q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \quad (7)$$

где K_η – коэффициент точности прогноза величины максимального оседания, определяемый графически (рисунок 3).

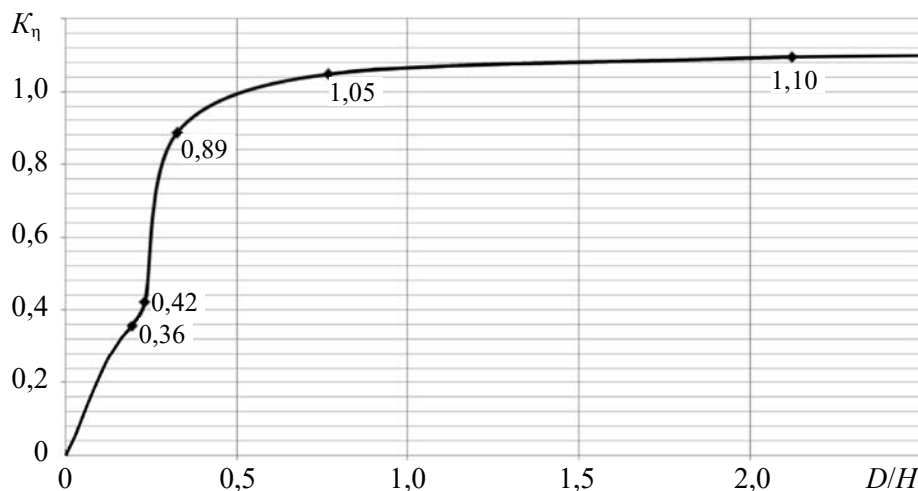


Рисунок 3. – Зависимость между относительным размером выработанного пространства D/H и коэффициентом точности прогноза величины максимального оседания K_η

Функция типовой кривой оседания $S(z)$ также имеет большое значение при расчете ожидаемой величины оседания, поскольку по ней формируется профиль в крыльевой части мульды сдвижения. Во всех случаях расположения реперов наблюдательной станции в крыльевой части мульды наблюдаются отклонения между фактическими и ожидаемыми значениями оседаний. Указанные отклонения могут быть связаны с погрешностью либо функции типовой кривой оседания $S(z)$, либо величины максимального оседания η_m или комплексного воздействия указанных факторов. Наиболее явно погрешность функции типовой кривой оседания $S(z)$ проявляется в случае, когда коэффициент точности прогноза величины максимального оседания K_η близок к единице.

В большинстве профильных линий наблюдается фактическая крутизна крыльев мульды сдвижения больше ожидаемой. Соответственно на каждом репере крыльевой части мульды фактическое оседание также меньше ожидаемого. Однако в 10 % случаев зафиксирован более пологий фактический профиль крыльевых частей мульды, чем это предусмотрено расчетом. Отмеченное требует решения, которое находится в области корректировки функции типовой кривой оседания $S(z)$. Особое внимание при этом необходимо обратить на интервал $S(0,2...0,8)$.

Заключение

Анализ и оценка результатов инструментальных наблюдений за деформациями земной поверхности в процессе эксплуатации шахт бассейна позволили установить случаи отклонения фактических значений деформации земной поверхности от ожидаемых, определенных по известным методикам расчета, и характеризовать особенности распределения величин оседаний земной поверхности при повторной подработке.

Для адаптации известных методик расчета к условиям повторной подработки рекомендуется для прогнозирования величины максимального оседания в произвольной точке мульды сдвижения использовать коэффициент точности прогноза величины максимального оседания, который зависит от относительного размера выработанного

пространства, а также рекомендуется уменьшить коэффициент перегрузки, что позволит повысить точность прогноза путем уменьшения расчетных величин оседания до уровня, отвечающего фактическим значениям.

Решение задач прогнозирования влияния горных работ на земную поверхность в перспективе следует рассматривать с позиции оптимизации значений функции типовой кривой оседаний и совершенствования действующей методики определения коэффициентов подработанности.

Изложенные предпосылки к уточнению действующих методик расчета максимальных оседаний земной поверхности в условиях повторной подработки и оптимизации коэффициента перегрузки способствуют повышению точности прогноза расчетных величин оседаний путем их уменьшения до уровня, отвечающего фактическим значениям. Меньшая величина расчетных оседаний приведет к сокращению объемов предусмотренных мер охраны, либо может служить основанием для принятия альтернативного решения по вопросу повторной подработки или охраны объектов земной поверхности. Экономический эффект, в таком случае, возникает из-за разности затрат на проведение защитных мероприятий при двух альтернативных решениях по вопросу повторной подработки. Сокращение расходов на мероприятия по охране поверхностных объектов от вредного влияния повторной подработки позволит вовлечь в отработку дополнительные участки месторождений.

Список использованных источников

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Видання офіційне // Галузевий стандарт. – К.: Мінпаливенерго України, 2004. – 128 с.

2. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных сланцевых месторождениях: утв. М-вом угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1989. – 96 с.

3. **Гусев, В.В.** Определение деформаций горных пород на шахте № 5 «Великомостовская» Львовско-Волынского бассейна с помощью глубинных реперов / В.В. Гусев, В.Н. Земисев // Горное давление, сдвижение горных пород и методика маркшейдерских работ. Труды ВНИМИ. – 1969.

4. **Иофис, М.А.** Расчет деформаций земной поверхности во Львовско-Волынском бассейне / М.А. Иофис // Труды ВНИМИ. – 1963.

5. **Петрук, Е.Г.** О характере протекания опасных деформаций поверхности при разработке угольных пластов на шахтах Львовско-Волынского бассейна / Е.Г. Петрук // Изв. вузов. Горный журнал. – 1967. – № 7.

6. **Викторов, С.Д.** Сдвижение и разрушение горных пород / С.Д. Викторов, М.А. Иофис, С.А. Гончаров. – М.: Наука, 2005. – 277 с.

7. **Голдаев, В.А.** Актуальность исследований процесса сдвижения и деформаций земной поверхности в условиях Львовско-Волынского каменноугольного бассейна / В.А. Голдаев // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых и инженерных подходов: сб. материалов V Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, 12 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: С.Ю. Солодовников [и др.]. – Минск, 2015. – С. 111-114.

8. **Голдаев, В.А.** Актуальность совершенствования нормативных документов для условий повторной подработки пластов Львовско-Волынского каменноугольного бассейна / В.А. Голдаев // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых и инженерных подходов: сб. материалов VI Междунар. науч.-

практич. конф. молодых ученых, Минск, 3 мар. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: С.Ю. Солодовников [и др.]. – Минск, 2015. – С. 160-163.

9. **Назаренко, В.А.** Закономерности расположения переходных точек наклонов земной поверхности в мульде сдвижения / В.А. Назаренко, Н.В. Йощенко, А.В. Голдаев // Научный вестник НГУ. – 2007. – № 9. – С. 13-16.

10. Анализ подработки подъездной железной дороги к шахте «Возрождение» лавами 486, 487, 488, 489, 490 шахты «Межиреченская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

11. Анализ подработки улиц села Остров лавами 560 и 561 шахты «Червоноградская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

12. Анализ подработки газопроводов в селе Остров лавами 435 и 436 шахты «Червоноградская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

13. Анализ подработки дамбы хвостохранилища ЦОФ «Червоноградская» лавами 412, 413, 414, 502 шахты «Великомостовская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

14. Анализ подработки газопроводов в хуторе Дженжеровка села Селец 307 лавой шахты «Заречная». – Червоноград, 2014. – 6 с.

15. Анализ подработки п.г.т. Горняк и подъездной железной дороги лавами 185 и 186 шахты «Межиреченская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

16. Анализ подработки сооружений поверхности лавами 408, 409, 410, 411 шахты «Великомостовская». – Червоноград, 2014. – 5 с.

17. Анализ подработки площадки насосной станции 2 подъема Межиреченского водозабора. – Червоноград, 2002. – 4 с.

18. Анализ подработки сооружений поверхности лавами 425, 403, 402 по наблюдательной станции «Межиреченская электроподстанция» шахты «Великомостовская». – Червоноград, 2009. – 4 с.

19. Проект подработки сооружений поверхности лавами 188, 189, 190 шахты «Межиреченская». – Червоноград, 2013. – 34 с.

20. **Голдаев, В.А.** Горно-геологические условия разработки пластов в условиях Львовско-Волинского каменноугольного бассейна / В.А. Голдаев // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых и инженерных подходов: сб. материалов VI Междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых, Минск, 3 мар. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: С.Ю. Солодовников [и др.]. – Минск, 2015. – С. 164-167.

Kologrivko A.A., Goldaev A.V., Goldaev V.A.

Specific aspects of the distribution of the value of the earth surface subsidence by the repeated underworking

The analysis and evaluation of the results of instrumental observations of deformations of the earth surface by the repeated underworking of Lviv-Volynsky Coal Basin is presented. The characteristics of the distribution of the values of subsidence of the earth surface as a result of the repeated underworking are described and recommendations are given for adapting the known calculating methodologies to the conditions of the repeated underworking. Prerequisites for updating of the known methodologies for calculating and forecasting the maximum subsidence of the earth surface under conditions of the repeated underworking are given.

Keywords: *subsidence of the earth surface, repeated underworking, forecast subsidence, method for calculating of the forecasted subsidence.*

Поступила в редакцию 16.08.2017 г.

УДК 622.268.6; 622.286

ПОДДЕРЖАНИЕ ВЫРАБОТОК СТАРОБИНСКОГО КАЛИЙНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВИДОВ КРЕПИ

Часть 1. Адаптация конструкции существующих анкеров повышенной несущей способности к местным условиям

Поляков А.Л., Мисников В.А., Лутович Е.А., Ерохин К.А. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь)

Статья является первой частью из серии, посвященной рассмотрению различных аспектов поддержания капитальных и подготовительных выработок с помощью специальных видов крепи. В данной работе рассмотрены вопросы использования в качестве одного из способов их поддержания анкерной крепи повышенной несущей способности и податливости. Дается обзор мирового опыта применения анкерных крепей высокой несущей способности, на основании которого формулируется направление совершенствования их конструкции для выработок калийных рудников Беларуси. Обосновываются требования к конструкции и характеристикам данного вида крепи.

Ключевые слова: *поддержание выработок, специальные виды крепи, анкерная крепь, соляные породы, большие глубины разработки, ползучесть пород.*

Введение

На Старобинском месторождении в процессе накопления и обобщения опыта поддержания выработок в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях [1, 2] уже сложились определенные подходы, формализованные в виде правил, нормативов по их охране и креплению. В связи с изменением условий, получением нового опыта данные документы периодически пересматриваются. К моменту написания статьи действует вторая и готовится к изданию третья редакция «Инструкции по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении» [1] (далее – Инструкция). Однако в текстах разных редакций Инструкции обоснования по выбору типа и параметров крепи отсутствуют, либо приведены в сжатом виде. Кроме того, сложилась определенная специфическая терминология, требующая пояснения для специалистов, не связанных тесно с эксплуатацией. Ниже приводятся некоторые обоснования параметров крепи и расшифровка некоторых терминов, используемых на месторождении.

Под поддержанием выработки в [1] понимается комплекс работ по содержанию выработки в состоянии, указанном в паспорте проведения и крепления, который включает в себя как способы охраны, так и средства и параметры крепления выработки.

Под способами охраны выработок в [1] для условий Старобинского месторождения понимается:

- рациональное расположение выработок в пласте и относительно друг друга;
- регулирование напряженного состояния вмещающих пород с помощью разгружающих выработок и компенсационных щелей (полостей), обеспечивающее безопасное состояние выработки на весь период срока службы.

К средствам крепления выработок относят анкерную крепь традиционного типа, а также специальные виды крепи.

Для упрочнения приконтурных пород капитальных и подготовительных выработок Старобинского месторождения традиционно применяются следующие виды анкер-

ной крепи. Широкое распространение получило упрочнение кровли выработок винтовыми анкерами, имеющими зацепление с породой по всей длине шпура. Длина этих анкеров в зависимости от пролета выработки и типа пород кровли составляет от 0,9 до 1,8 м. Сшивки пород кровли обеспечиваются при креплении по сетке от 0,5 до 1,5 м. Несущей способности анкеров (70-100 кН) хватает для того, чтобы создать равнопрочную конструкцию, обеспечивающую необходимый отпор более слабым вышележащим породам кровли. Для подвешивания отслоившихся пород применяются анкера с клино-распорным замком типа «Эстонсланец» длиной от 0,9 до 2,0 м. Несущая способность данных анкеров составляет от 50 до 110 кН.

Специальная крепь может быть выполнена в виде анкерной крепи повышенной несущей способности, стальной, комбинированной, навесной и деревянной. Данные виды крепи применяются в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, в том числе и на больших глубинах разработки. Все виды специальной крепи предназначены для установки на участках эксплуатируемых выработок, где могут возникнуть осложнения с их поддержанием. Крепь может устанавливаться как сразу после проведения выработки, так и при ремонте последней.

Далее рассмотрим более подробно условия применения анкерной крепи с повышенной несущей способностью. В отличие от других видов специальной крепи она еще не успела себя зарекомендовать у эксплуатационников, информация о ней будет включена лишь в готовящуюся в настоящее время 3-ю редакцию Инструкции, в связи с чем данная информация обладает определенной новизной.

Основная часть

Анкерная крепь с повышенной несущей способностью предназначена для подвешивания на канатных или арматурных элементах слабоустойчивых пород кровли, находящихся в зоне возможного обрушения (в пределах свода равновесия), высота которой превышает максимальную длину традиционно используемых анкеров. В данном сегменте альтернативой применения этой анкерной крепи является механизированная оборка ослабленных пород кровли под сформировавшийся свод возможного обрушения с дальнейшим укреплением свежесформированного контура ставшими уже традиционными видами крепи.

Ситуации, в которых традиционные анкера не полностью выполняют свои функции, могут возникать при наличии двух и более перечисленных ниже условий:

- содержание неустойчивых глинистых пород в формирующейся зоне возможного обрушения пород кровли более 30 %;
- пролет выработки, узла сопряжения более 3,5 м, либо выработка охраняется компенсационными щелями, нарезанными в боках, кровле;
- высокие скорости смещений кровли (в условиях длительного влияния очистных работ, соседних выработок, на глубинах разработки более 750 м).

Под сводом возможного обрушения здесь понимается высота $h_{\max}$ разрушенных (т.е. расслоившихся, частично потерявших сплошность и способность сопротивляться нагрузкам) пород кровли от контура выработки. С высокой достоверностью максимально возможная для пролета выработки b высота $h_{\max}$ может быть определена по формуле:

$$h_{\max} = 0,5 \cdot \operatorname{tg} 55^{\circ} \cdot b, \quad (1)$$

где 55° – угол внутреннего трения и сцепления в породном соляном массиве, под этим углом формируется свод обрушения в выработках;

b – фактический (максимальная ширина), либо эквивалентный (учитывающий сложную форму поперечного сечения) пролет выработки. В выработках сводчатой формы сечения, пройденных комбайном типа ПК-8, эквивалентный пролет меньше фактической ширины на величину $0,67 \cdot R$ (где R – радиус закругления свода, равный 1,5 м). Более подробно об определении эквивалентного пролета сказано в Инструкции [1].

На практике же свод равновесия не сразу достигает своих максимальных размеров, а этот процесс растягивается во времени в зависимости от глубин разработки, агрегатной прочности пород [2]. В связи с этим, ремонт выработок производят в несколько этапов, в каждом из которых оборку кровли осуществляют лишь до ближайшей, не потерявшей устойчивость, мощной защитной пачки сильвинита или каменной соли.

Обоснованию выбора параметров анкерных крепей для специальных условий применения посвящены статьи [3-5]. В статьях [3, 4] выбор несущей способности анкеров, их длину и податливость предлагается определять по величине прогиба, который в капитальных выработках при сроке их эксплуатации от 15 до 30 лет на глубинах 700-900 м составляет до 0,9 от максимально возможного $h_{\max}$. В данной работе установлено, что расслоение пород кровли в выработках происходит на высоту h_p , которая зависит от пролета выработки b , и в наиболее широких ее участках – на узлах сопряжений – достигает 3,0-3,5 м, что превышает в 1,5-2,5 раза длину традиционно используемых анкеров. Зависимость между h_p и b имеет вид:

$$h_p = 0,0119 \cdot b^3 - 0,2447 \cdot b^2 + 2,1622 \cdot b - 4,0513, \text{ м,} \quad (2)$$

при $2,5 < b < 10$.

В работе [4] получена также зависимость между высотой расслоений h_p и прогибом кровли U_p :

$$U_p = -0,00473 \cdot h_p^2 - 0,03348 \cdot h_p - 0,04466, \text{ м,} \quad (3)$$

при $0,05 < U_p < 0,4$.

Податливость анкерной крепи U_ϕ в работе [2] предлагается определять с учетом 15 % запаса:

$$U_\phi = 1,15 \cdot U_p. \quad (4)$$

В работе [5] несущую способность крепи рекомендовано увеличить в два раза (до 200 кН), а податливость – до 200-250 мм.

Полученные результаты исследований [3-5] позволили определиться с выбором параметров крепей повышенной несущей способности, разрабатываемых для условий калийных рудников Старобинского месторождения, и послужили ориентиром для направления дальнейших исследований, в том числе, поисков новых типов крепей.

На основании использования патентных и других научно-технических источников изучен зарубежный опыт крепления выработок анкерной крепью на глубинах разработки свыше 800 м в слабоустойчивых породах. Выявлены ведущие страны и фирмы, занимающиеся производством анкерных крепей, а также креплением подготовительных и капитальных выработок в сложных геологических условиях с использованием анкерной крепи.

Как показал мировой опыт передовых угледобывающих стран (США, Англия, Австралия, Германия), при увеличении глубины разработки капитальные и подготовительные выработки подвергаются большим деформациям, и применяемая анкерная крепь, имеющая ограниченную конструктивную податливость и несущую способность, не в состоянии противостоять разрушающему воздействию горного давления. Начиная с 2001 года, все очевиднее становится использование анкерной крепи в качестве со-

ставного элемента в системе штрековой крепи и, в первую очередь, в комбинации с металлической арочной или трапецевидной рамной крепью на угольных шахтах. На рисунке 1 показано изменение направлений использования анкерной крепи на шахтах Западной Европы во времени и с ростом глубины разработки.

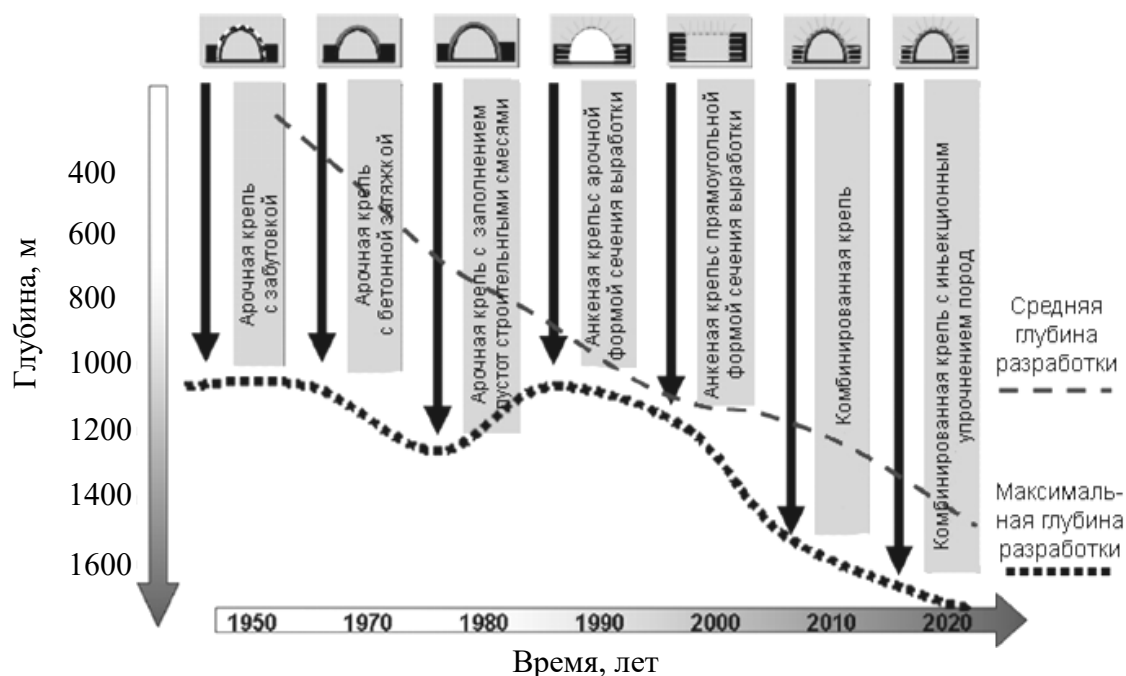


Рисунок 1. – Изменение направлений использования анкерной крепи на шахтах Западной Европы во времени и с ростом глубины разработки [6]

Как видно из рисунка, в 50-х годах прошлого века на шахтах Западной Европы применялась арочная крепь с забутовкой, а в 70-х и 80-х годах, соответственно, с бетонной затяжкой и применением строительных смесей, то при достижении глубины более 1000 м в 90-х годах начали применять анкерную крепь в выработках с арочной формой сечения, а на границе веков – и с прямоугольной формой сечения.

Применение анкеров позволило: снизить расходы на материалы и оборудование; повысить производительность проходки; уменьшить трудоемкость раскрепления участков сопряжения лавы со штреком. В следующее десятилетие прогнозируемая глубина разработки опустится до 1400-1700 м, в этих условиях предполагается применять комбинированную крепь с инъекционным упрочнением пород. Техника и технология для такого крепления выработок уже существуют, это анкера типа One-Step и инъекционные анкера с быстрым нарастанием сопротивления [6]. Основным мотивом применения новых крепей является предупреждение разрыхления породного массива за счет быстрой установки анкеров сразу же после обнажения породного массива.

Тенденцию совершенствования конструкции анкеров можно проследить по графику, представленному на рисунке 2.

Если первыми были анкера распорного типа с несущей способностью $R = 160$ кН, использующие принцип фрикционного стопорения, то уже в 80-х годах состоялся переход на анкера, использующие патроны с быстротвердеющим полимерным составом, обеспечивающим более высокую несущую способность и передачу усилий по всей длине стержня. В этот период начали широко применяться канатные анкера ($R = 300$ кН) и анкера из арматурной стали ($R = 360$ кН).

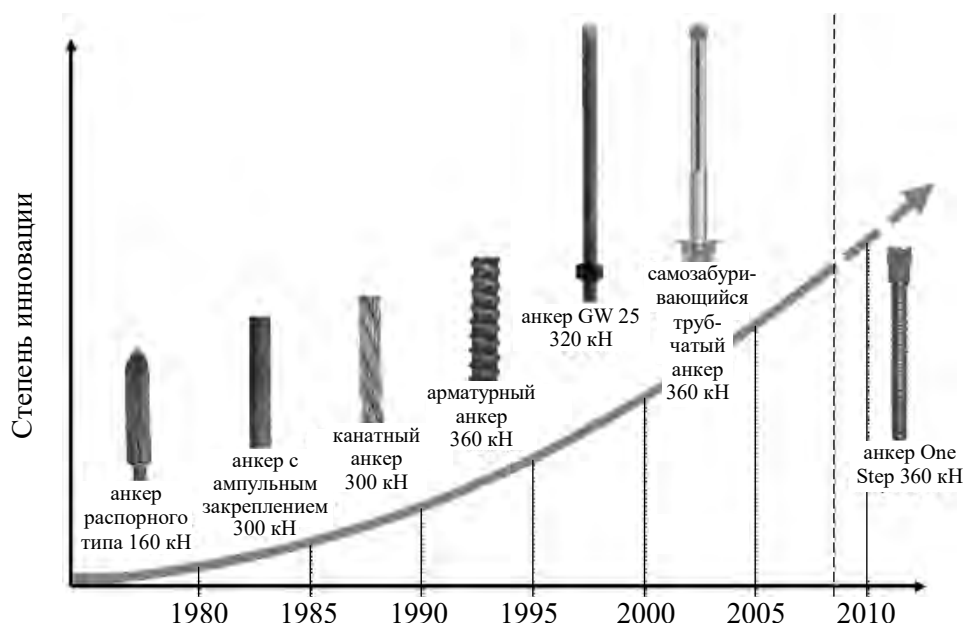


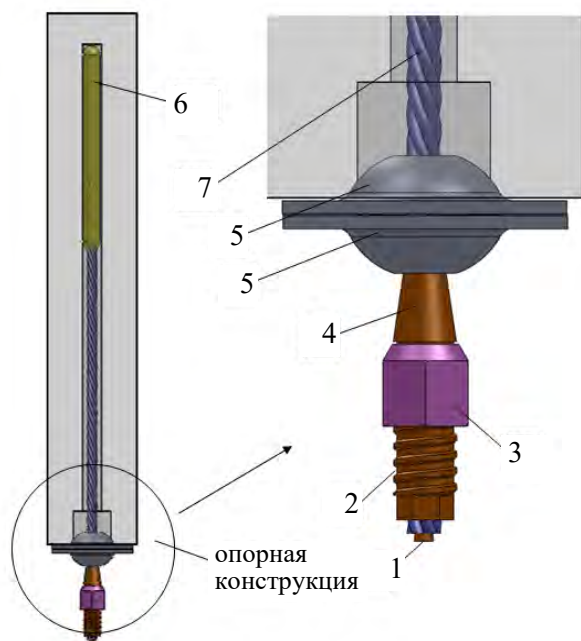
Рисунок 2. – Этапы развития конструкции анкерной крепи для шахт Западной Европы [6]

В 1977 году появились фрикционные трубчатые анкеры типа Split Set, представляющие собой металлическую трубу из пружинной стали с прорезью вдоль оси. Диаметр этой трубы подбирался под диаметр шпура таким образом, чтобы анкер мог задавливаться в шпур с натягом. С целью увеличения сцепления анкера со стенками шпура внутри трубы могли располагаться ампулы с расширяющимся цементным раствором. Испытания трубчатых анкеров типа Split Set, изготовленных и предоставленных нам ЗАО «Кузбасспромсервис» под маркой «фрикционный анкер АФ-46», проведены в условиях капитальных выработок рудника 4 РУ [7]. Однако оказалось, что установка данных анкеров в шпуры диаметром 42 мм вручную весьма трудоемка, средства механизации их установки в настоящее время на Солигорских калийных рудниках отсутствуют. Тем не менее, сделан вывод, что фрикционные анкера могут быть использованы для крепления приконтурного породного массива выработок калийных рудников. Если сразу после установки забивкой на 1 метр анкер вытягивается из шпура при достижении осевого усилия 52-54 кН, то при его длине забивки 2-3 м и зажатии слоями кровли за счет продольного сдвига ожидаемая несущая способность может быть существенно (в 3-4 раза) выше.

На рубеже веков крупнейшими производителями Европы осуществлена стандартизация анкеров, создан анкер GW 25 ($R = 320$ кН). Анкер выполнен из арматурной стали периодического профиля, имеет 25 мм в диаметре, производится фирмами: САК Ankertechnik GmbH Moers, BWZ Berg-und Bottrop Industrietechnik GmbH, Германия [6]. Анкера данного типа в настоящее время начали производить для своих шахт предприятия Кузбасса [8]. Совместно со специалистами этих предприятий (ООО «АМК» и ООО «РАНК2») нами проведены испытания [7] анкеров из арматурной винтовой стали диаметром 16, 20 и 25 мм марки АКМ, показавшие, что их несущая способность при закреплении в шпурах диаметром 42-46 мм ампулами с быстросхватывающейся минеральной композицией АМК соответственно составляет 150, 200 и 250 кН. Наиболее хорошо зарекомендовали себя в калийных рудниках Старобинского месторождения с точки зрения легкости установки и несущей способности анкера из арматурной винто-

вой стали А500С диаметром 25 мм. С помощью специальных соединительных муфт их длина без потери несущей способности может быть увеличена до 6 м.

Сегодня на глубинах свыше 800 м в шахтах Западной Европы анкерная крепь является обязательным элементом комбинированной штрековой крепи. Несущая способность анкерных штанг нового поколения (по прочности на разрыв) диаметром 25, 27 и 30 мм составляет соответственно 250, 350 и 500 кН. Эффективное и надежное крепление капитальных и подготовительных выработок обеспечивается использованием сталеполимерных анкеров с повышенной несущей способностью (200-250 кН и более), а также канатных анкеров с аналогичной несущей способностью и глубиной заложения 3-6 м. Нами неоднократно в различных условиях проводились испытания канатных анкеров типа АК-01, изготавливаемых из арматурного каната типа К7 как предприятиями Кузбасса, так и собственного производства. Длина анкеров составляла 3 и 5 м. Анкера устанавливались в шпуров диаметром 27, 42 и 46 мм с закреплением с помощью ампул с минеральной композицией типа АМК. Несущая способность анкеров данного типа спустя две недели после их установки составляла не менее 220-240 кН.



1 – клин конусный; 2 – муфта с резьбой под спецгайку; 3 – гайка под муфту анкера коническая; 4 – гильза конусно-цилиндрическая; 5 – шайба опорная полусферическая; 6 – ампулы с минеральной композицией АМК Ø35; 7 – канат К7 Ø15
Рисунок 3. – Крепь анкерная канатная с элементом податливости АК01/1 из каната типа К7

Повышенная податливость новых видов анкерной крепи обеспечивается за счет применения специальных опорных шайб, гибких подхватов. Нами проведены шахтные испытания полусферических опорных шайб из листового металла толщиной не менее 8-10 мм. Установлено, что использование одной полусферической шайбы обеспечивает податливость крепи на 30-40 мм, а при использовании двух шайб (рисунок 3) – до 90 мм при сохраняющейся высокой реакции отпора ($R = 120-160$ кН).

При необходимости увеличения податливости анкеров с повышенной несущей способностью сегодня предлагается использовать специальные податливые элементы бочкообразной формы (рисунок 4). Проведенные нами испытания податливых элементов из ослабленных вырезами отрезков труб диаметром 42 мм и толщиной стенок 6 мм показали, что при этих параметрах реакция отпора податливой конструкции составляет не менее

140 кН. Необходимая величина податливости анкера может быть обеспечена путем подбора соответствующих элементов податливости. Недостатком данного способа управления податливостью анкера является наличие выступающей за пределы контура выработки его конструкции, что может быть небезопасным для проезжающих по выработке транспортных средств.

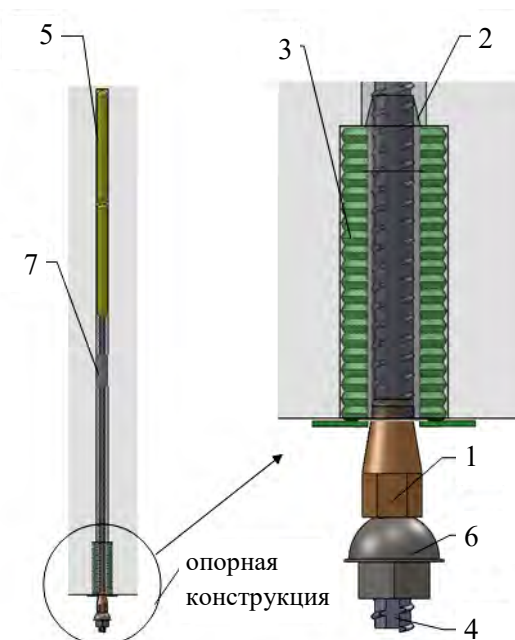


Рисунок 4. – Различные виды податливых элементов для анкеров повышенной несущей способности

Данная проблема может решаться двумя способами: путем размещения податливых элементов в специальной расширенной части шпура (рисунок 5), либо применением специальных анкеров глубокого заложения типа «Roofex» (рисунки 6а и 6б), разработанных в компании Atlas Copco [6].

Анкер «Roofex» представляет собой арматурный стержень из высокопрочной стали, помещенный в гладкую пластиковую гильзу, который укрепляется в скважине с помощью цементного раствора или эпоксидной смолы. Анкер также оборудован запатентованным гасителем энергии, который представляет собой скользящий элемент, закрепленный поверх высокопрочного стального стержня. Он позволяет анкеру удлиняться под воздействием нагрузки, сохраняя при этом свою несущую способность. В зависимости от анкера его характеристики для шпура диаметром 28-50 мм могут быть следующие: номинальное сопротивление 100 или 200 кН, предельная податливость 300 мм. Анкера выпускаются длиной от 2,4 до 3,6 м. К сожалению, испытания данного типа анкера и оценка его работоспособности в условиях Старобинского месторождения до настоящего времени по объективным причинам не были проведены. Однако сам принцип обеспечения высокой податливости при высоком (более 200 кН) сопротивлении нами был реализован в конструкции, приведенной на рисунке 5.

Величина податливости данного анкера зависит от длины опорной разрезной обоймы 3, размещаемой в расширяемой до диаметра 60-80 мм части устья шпура. Обеспечение необходимого сопротивления анкера в режиме податливости осуществляется за счет смятия трубчатых вкладок при прохождении через них конусно-цилиндрической гильзы 1.



- 1 – гильза конусно-цилиндрическая; 2 – втулка распорная разрезная; 3 – обойма опорная разрезная;
- 4 – арматура Ø25 винтового профиля типа А500С;
- 5 – ампула с минеральной композицией АМК Ø35;
- 6 – гайка анкерная Т27×13.2 на арматуру Ø25;
- 7 – муфта соединительная Ø25

Рисунок 5. – Крепь анкерная арматурная составная с элементом податливости АКМ25.01/1, располагаемым в углублении шпура



Рисунок 6. – Внешний вид анкера «Roofex» (а) и схема работы анкерной системы (б)

Представляет интерес применение в качестве податливого элемента канатных анкеров цанговых зажимов [9]. К сожалению, результаты первых испытаний опытной партии цанговых зажимов, изготовленных на одном из предприятий Солигорска, завершились неудачей: не удалось обеспечить работу зажимов в режиме сопротивления более чем 100 кН. Однако считаем, что поиск в данном направлении должен быть продолжен.

Также получен отрицательный результат опыта применения для закрепления анкеров ампул с синтетическими смолами, которые имеют с соляными породами плохую адгезию. Вместе с тем, применение ампул с минеральной композицией типа АМК, по сравнению с самостоятельно изготавливаемой цементно-песчаной смесью, показало, что они существенно облегчают процесс установки крепи и обеспечивают ее работоспособность в заданном режиме. В случае массового использования анкерной крепи будет целесообразным размещение производства ампул с минеральной композицией на территории республики.

Заключение

С переходом горных работ на рудниках ОАО «Беларуськалий» на большие (свыше 800 м) глубины разработки становится актуальным вопрос поддержания горных выработок. В этих условиях традиционные виды анкерной крепи не обеспечивают полноценного решения данной задачи. Проведенные обследования состояния выработок показали, что для их поддержания в течение 15-30 лет требуется изменение параметров анкеров по сравнению с традиционными: увеличение их длины в 1,5-2,5 раза (до 3-6 м), несущей способности анкеров в два раза (до 200 кН), а податливости до 200-250 мм.

Анализ обзора опыта применения анкерной крепи на различных месторождениях мира показал, что повсеместно имеются тенденции к росту несущей способности крепи, глубины заделки анкеров в породы кровли, применения комбинации анкеров различной длины, либо комбинации анкерной и рамной крепей [10]. Некоторые типы анкерных крепей повышенной несущей способности (арматурные, канатные анкера и др.) стали массово применяться на горных предприятиях стран, ранее входивших в СССР, и с некоторой адаптацией могут быть использованы для рудников Старобинского месторождения. Отдельные элементы этих крепей могут производиться на предприятиях Солигорска, некоторые (арматурный канат и прокат с винтовым профилем, ампулы с минеральной композицией) должны приобретаться. Полученный опыт адаптации анкеров повышенной несущей способности позволил оценить важность, ценность интеграции с мировыми и региональными производителями данной крепи и показал, что лучшие результаты получаются при ориентации на лучшие мировые достижения и опыт поддержания выработок в аналогичных условиях.

Список использованных источников

1. Инструкция по охране и креплению горных выработок на Старобинском месторождении. – Солигорск-Минск, 2010. – 125 с.
2. Поддержание горных выработок при разработке Старобинского месторождения на больших глубинах / В.А. Тараканов [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 36-38.
3. Испытания новых типов анкерной крепи на Старобинском месторождении калийных солей / Д.Т. Карабань [и др.] // Горная механика. – 2008. – № 2. – С. 41-49.
4. **Прушак, В.Я.** Определение дополнительных параметров анкерной крепи на рудниках Старобинского месторождения калийных солей / В.Я. Прушак, Д.Т. Карабань, В.А. Губанов // Горная механика. – 2008. – № 4. – С. 29-36.
5. Обоснование конструктивных особенностей анкерной крепи для калийных рудников Старобинского месторождения / А.Л. Поляков [и др.] // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: сб. тр. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 231-234.
6. **Егоров, П.В.** Анкерное крепление горных выработок за рубежом. Анализ опыта создания, становления и современного состояния и другое / П.В. Егоров, А.В. Ремезов, С.Е. Решетов. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. – 211 с.
7. Результаты испытаний анкерной крепи повышенной несущей способности в выработках Солигорских калийных рудников / Д.Т. Карабань [и др.] // Научные исследования и инновации: вестник ПНИПУ. – 2011. – С. 129-131.
8. Совершенствование способов и средств крепления сопряжений очистных забоев с примыкающими выработками / А.В. Ремезов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2003. – 167 с.
9. **Hutchinson, D. Jean.** Cablebolting in Underground Mines / D. Jean. Hutchinson, M.S. Diederichs. – BiTech Publishers Ltd., British Columbia, 1996. – 406 p.
10. О необходимости перехода на двухуровневое анкерное крепление подготовительных выработок рудников Старобинского месторождения / А.Л. Поляков [и др.] // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: сб. тр. 9-й междунар. конф. / БНТУ. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 88-92.

Polyakov A.L., Misnikov V.A., Lutovich E.A., Erokhin K.A.

Maintaining of Starobin potash deposit workings using special types of the support. Part 1. Requirements for maintaining of the workings using increased bearing capacity anchors

The article is the first part of a series devoted to consideration of various aspects of maintaining of capital and preparatory workings using special types of the support. The article considers general issues related to factors affecting the stability of mine workings, as well as the use of increased bearing capacity anchor supports as one of maintaining methods.

The review of the world experience in the use of increased bearing capacity anchor supports is given. A method of their design improvement for Belarusian potash mines is formulated on the basis of the review. Design and specifications requirements of this type of support are proved.

Keywords: *maintaining of workings, special types of the support, anchor support, salt rocks, deep mining, rocks flow.*

Поступила в редакцию 05.09.2017 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.833.06

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРЕЦЕССИОННОЙ ПЕРЕДАЧИ ПУТЕМ РЕАЛИЗАЦИИ ЕЮ ФУНКЦИИ КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ МУФТЫ

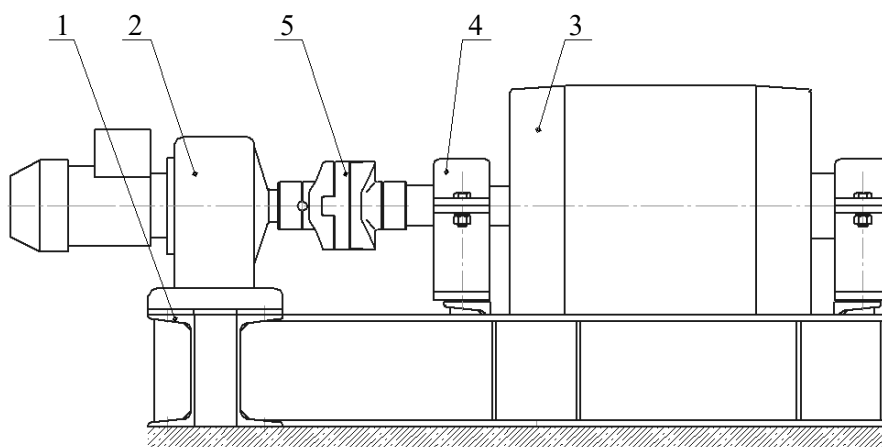
Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Трусов И.В., Макаревич С.Д. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

В статье рассматривается конструктивное решение прецессионной передачи, позволяющее реализовать в ней функцию компенсирующей муфты, необходимую для уменьшения влияния погрешностей взаимного пространственного расположения выходного вала передачи и вала рабочего органа. Приводятся результаты компьютерных, стендовых и эксплуатационных испытаний редуктора на основе предложенного варианта прецессионной передачи, доказывающих наличие у него компенсирующих свойств.

Ключевые слова: планетарная прецессионная передача, компенсирующая муфта, обобщенная погрешность, привод, ковшовый элеватор.

Введение

Электромеханические приводы широко распространены в промышленности и сельском хозяйстве. Как правило, они состоят из электродвигателя, редуктора (мотор-редуктора) 2, рабочего органа 3 и рамы 1, на которой крепятся указанные изделия. Между выходным валом мотор-редуктора и валом рабочего органа 3, расположенного на опорных элементах 4, для компенсации несоосности валов должна располагаться компенсирующая муфта 5 (рисунок 1).



1 – рама привода; 2 – мотор-редуктор; 3 – рабочий орган;
4 – подшипниковая опора; 5 – муфта

Рисунок 1. – Монтаж электромеханического привода на стационарном фундаменте, обеспечивающем относительную жесткость крепления его узлов

Однако на практике встречаются случаи, когда по технологическим или конструктивным соображениям установка привода на жесткой раме невозможна. Например, монтаж электромеханических приводов на недостаточно жестких стержневых конструкциях на значительной высоте. При этом упругие деформации элементов конструкции, вызванные ветровыми нагрузками, а также температурными воздействиями, приводят к несоосности между вращающимися звеньями привода, которая в некоторых случаях не может быть компенсирована применяемыми для этих целей муфтами. Ужесточение элементов конструкции привода приводит к увеличению его массы и габаритов, а следовательно, и повышению себестоимости изготовления.

Минимизация массы, габаритов и стоимостных показателей электромеханических приводов является актуальной задачей. Наиболее эффективным путем решения указанной проблемы является разработка электромеханического привода, состоящего из рабочего органа, на корпусной детали которого прикреплен с помощью фланца мотор-редуктор. Однако при непосредственном креплении мотор-редуктора с помощью фланца на корпусе рабочего органа неизбежно возникает погрешность, заключающаяся в несоосности выходного вала мотор-редуктора и вала рабочего органа привода. Устранить эту погрешность путем повышения требований к точности изготовления и монтажа деталей привода экономически нецелесообразно, так как повышается его себестоимость. Применение различного рода элементов, компенсирующих несоосность валов при монтаже привода, требует высокой квалификации персонала, выполняющего сборку. Кроме этого, при эксплуатации электромеханического привода с компенсирующими элементами нет никаких гарантий, что из-за различного рода деформаций, вызванных температурным расширением или поводкой металла, не возникнет взаимных перекосов его деталей. Указанный перекоп может привести к критическому ухудшению эксплуатационных показателей привода и даже к потере его работоспособности.

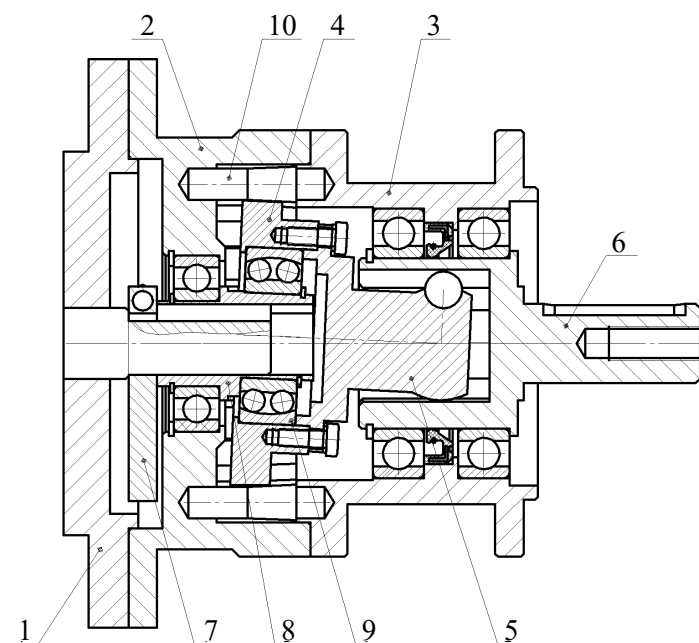
Основная часть

Одним из способов, позволяющих сохранить работоспособность привода при наличии несоосности валов мотор-редуктора и рабочего органа, является использование в приводе редуктора, эксплуатационные показатели которого нечувствительны в широких пределах к указанной выше погрешности. Разработка такого редуктора стала возможной на основе прецессионной передачи [1].

Общий вид редуктора, разработанного на основе планетарной прецессионной передачи типа К-Н-V с коническими роликами, показан на рисунке 2.

Прецессионный мотор-редуктор состоит из расположенного на входном валу электродвигателя 1, противовеса 7, косоугольного эксцентрикового кривошипа 8, корпуса 2 и 3 с равномерно размещенными на его внутренней поверхности коническими роликами 10, представляющими собой зубчатый венец, контактирующий с зубчатым венцом сателлита 4. Сателлит 4 составляет сферическую пару посредством сферического подшипника 9 с косоугольным эксцентриковым кривошипом 8. Сателлит 4 жестко закреплен с хвостовиком муфты 5, шарики которой, расположенные в радиальных отверстиях хвостовика, также размещены в осевых цилиндрических пазах выходного вала 6.

В предлагаемом варианте прецессионной передачи возможна компенсация погрешностей изготовления звеньев самой передачи. То есть, выходной вал 6 может иметь погрешность, заключающуюся в несоосности его оси с входным валом редуктора. Стоит отметить, что выходной вал 6 не является плавающим, так как он жестко зафиксирован на подшипниках относительно корпуса 3 редуктора. Компенсация погрешностей в рассматриваемом варианте передачи при ее монтаже в приводе не может быть осуществлена из-за жесткой фиксации выходного вала в корпусе редуктора.



1 – электродвигатель; 2 – корпус левый; 3 – корпус правый; 4 – сателлит;
5 – угловая муфта; 6 – выходной вал; 7 – противовес; 8 – эксцентрик;
9 – сферический подшипник; 10 – конический ролик

**Рисунок 2. – Общий вид планетарного прецессионного редуктора
с коническими роликами**

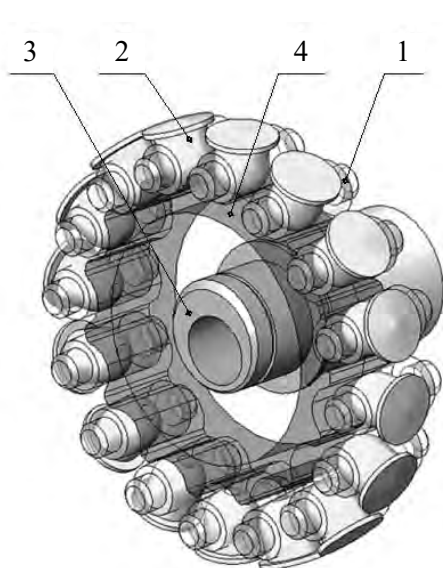
Для перехода от конструкции прецессионной передачи с жестким расположением оси выходного вала к передаче с функцией компенсирующей муфты было предложено использовать в качестве зубьев центрального колеса вместо конических сферические ролики [2].

Трансформация прецессионной передачи с коническими зубьями в прецессионную передачу со сферическими зубьями центрального колеса поясняется на рисунке 3. На рисунке 4 показан общий вид прецессионного редуктора со сферическими зубьями, прикрепленного с помощью фланца к корпусу рабочего органа установки.

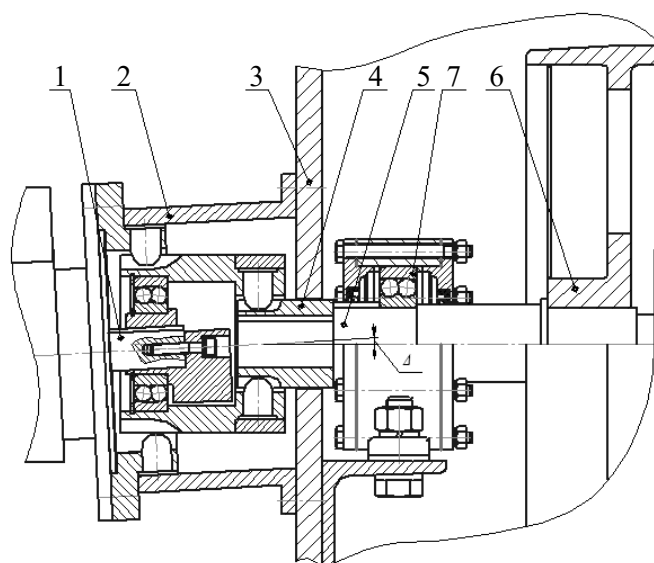
В предлагаемой конструкции передачи со сферическими зубьями допускается не только угловое, но и радиальное смещение оси выходного вала 4 относительно оси вращения входного вала 1. Указанное смещение будет компенсироваться при работе передачи благодаря наличию в контакте сферических поверхностей зубьев центрального колеса, а также благодаря наличию в конструкции передачи угловой муфты.

Анализ взаимного пространственного расположения входного и выходного валов передачи позволил установить, что возникающие погрешности расположения могут быть сведены к одной обобщенной погрешности s , которая определяется отклонением точки прецессии прецессионной передачи от оси вращения ее входного вала.

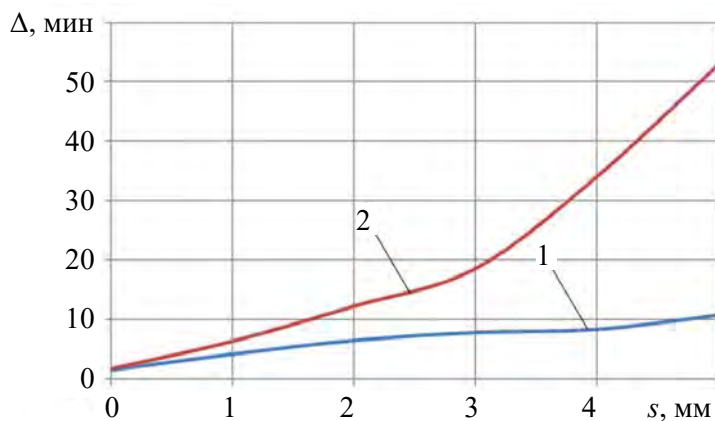
Результаты исследований компьютерных моделей различных вариантов прецессионной передачи, отличающихся возможностью учитывать обобщенную погрешность при определении ее основных эксплуатационных свойств, позволили установить, что в предложенном варианте зацепления прецессионной передачи со сферическими зубьями центрального колеса при значении обобщенной погрешности порядка 5 мм кинематическая погрешность Δ вращения выходного вала в 5 раз ниже (рисунок 5), а КПД (η) – на 28 % выше по сравнению с вариантом зацепления прецессионной передачи, имеющим коническую форму зуба центрального колеса (рисунок 6).



1 – заменяемый конический ролик;
2 – зуб сферической формы;
3 – входной вал; 4 – сателлит
Рисунок 3. – Механизм замены зубьев конической формы на зубья сферической формы центрального колеса в прецессионной передаче

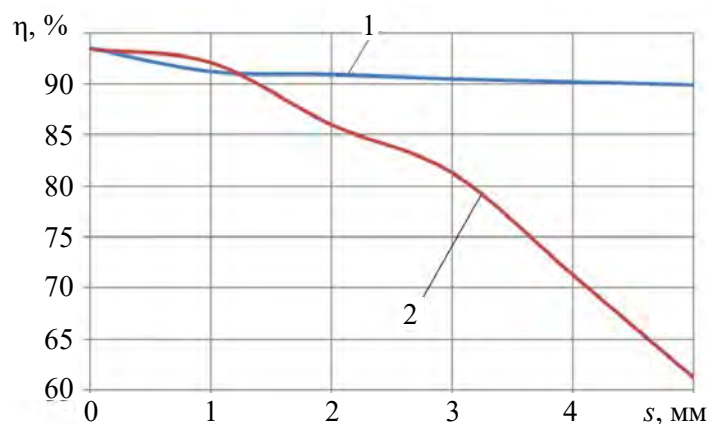


1 – вал электродвигателя; 2 – корпус передачи;
3 – корпус рабочего органа; 4 – выходной вал;
5 – вал рабочего органа; 6 – рабочий орган;
7 – опорный узел рабочего органа
Рисунок 4. – Общий вид прецессионного редуктора со сферическими зубьями, прикрепленного с помощью фланца к корпусу рабочего органа установки



1 – зацепление на основе сферических зубьев;
2 – зацепление на основе конических зубьев
Рисунок 5. – Графическая зависимость максимального значения кинематической погрешности прецессионной передачи от обобщенной погрешности

Результаты сравнительных экспериментальных исследований изготовленных образцов прецессионных мотор-редукторов позволили установить, что при наличии обобщенной погрешности, равной 5 мм, в конструкции прецессионного редуктора со сферическими зубьями центрального колеса кинематическая погрешность в 4,5 раз ниже, а КПД – на 40 % выше, чем в конструкции прецессионного редуктора с конической формой зубьев центрального колеса, что подтвердило адекватность результатов компьютерных исследований.



1 – сферическая форма зуба; 2 – коническая форма зуба

Рисунок 6. – Графики зависимости среднего значения КПД от обобщенной погрешности

Ресурсные и эксплуатационные испытания прецессионного редуктора со сферическими зубьями в составе привода ковшового элеватора (нории) (рисунок 7), подтвердили его работоспособность и возможность реализации передач функции компенсирующей муфты.



1 – голова норрии; 2 – прецессионный мотор-редуктор; 3 – рама привода;
4 – разгрузочный патрубок

Рисунок 7. – Общий вид привода ковшового элеватора со встроенным в его конструкцию прецессионным редуктором

Результаты технико-экономического анализа позволили выявить преимущества привода с прецессионным редуктором по сравнению с применяемым в настоящее время червячным редуктором (SITI MU 110 15/1, производства Италия) по массе (в 1,15 раза), габаритным размерам (в 1,4 раза), что обосновало целесообразность применения предложенного прецессионного редуктора в конструкции привода ковшового элеватора [3].

Выводы

Использование в зацеплениях прецессионной передачи и угловой муфты зубьев сферической формы, а также замена радиальных подшипников качения на сферические позволили реализовать в редукторе на основе указанной передачи функцию компенсирующей муфты. Величина компенсированной погрешности, при которой редуктор сохраняет свои эксплуатационные свойства в допустимых пределах, составляет 5 мм.

Список использованных источников

1. Планетарная прецессионная передача: пат. 14938 Респ. Беларусь, МПК F16H1/32 / П.Н. Громыко, И.В. Трусов, П.С. Гончаров; заявитель УОВПО «Белорус.-Рос. ун-т». – № а20091553; заявл. 02.11. 09; опубл. 30.10.11. // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 151-152.
2. Конструкция планетарного прецессионного редуктора с радиальными сферическими пальцами / П.Н. Громыко [и др.] // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 71-72.
3. **Трусов, И.В.** Разработка прецессионного редуцирующего механизма с радиальными сферическими пальцами для привода ковшового элеватора зерносушильного комплекса / И.В. Трусов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 1. – С. 62-71.

Gromyko P.N., Hatetovskii S.N., Trusov I.V., Makarevich S.D.

Expanding of possibilities of precession transfer by implementing the compensating coupling function

The article considers a structural concept of the precession transmission that allows to implement the flexible coupling function, that is required for minimization of the errors of mutual spatial relationship between the transmission output shaft and the working body shaft. The article adduces the results of computer, benchmark and operational trials of the reducer on the basis of the suggested precession transmission options suggesting that it has compensating properties.

Keywords: *planetary precession transmission, flexible coupling, generalized error, drive, bucket elevator.*

Поступила в редакцию 17.05.2017 г.

УДК 621.65.01

О РАБОТЕ РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ВВОДЕ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

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

Установлена зависимость отдельных параметров радиальной турбины от направления потока рабочей среды. Выведены формулы для определения скоростей движения среды и лопастей турбины, а также давления, создаваемого средой на лопасти колеса, в зависимости от угла наклона лопастей и от направления движения среды. Получены выражения для определения скорости движения среды под действием центробежной силы и давления, создаваемого ею. Приведены графические зависимости отношений скоростей движения среды в межлопастном пространстве к начальной скорости среды и к окружной скорости турбины, а также создаваемого давления от угла наклона лопастей и от направления движения среды.

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

Введение

Основным уравнением центробежной машины, на основе которого может быть рассчитана энергия, воспринимаемая турбиной от рабочей среды, является уравнение Эйлера [1, 2], согласно которому давление, создаваемое средой на лопасти, равно произведению плотности среды на окружную скорость турбины и на тангенциальную скорость среды. В работе [3] проведен анализ сил, возникающих при воздействии рабочей среды, вводимой радиально, на рабочее колесо радиальной турбины. Определено, что в известном уравнении учитывается только часть энергии, передаваемая рабочей средой в тангенциальном направлении. Другая ее часть расходуется на преодоление сопротивления лопастей и на скорость вращения турбины непосредственно не влияет. Центробежная сила, направленная радиально, перемещает среду к периферийным областям лопастей, способствует увеличению расхода среды через турбину и снижает затраты на преодоление сопротивления лопастей.

Поток среды может вводиться в корпус турбины тангенциально, а также перед ее лопастями проходить через направляющее устройство, в результате чего среда приобретает вращательное движение, что положительным образом влияет на показатели машины. В настоящей работе проводится анализ параметров работы радиальной турбины при закручивании входного потока среды.

Результаты исследований

На отдельную лопасть, размещенную под углом β к направлению, противоположному окружной скорости турбины, воздействует поток среды под углом $-\alpha$ к этому направлению (рисунок 1). Отрицательное значение угла α принято вследствие того, что он и угол β расположены по разные стороны от указанного выше направления. Под воздействием среды лопасть вращается с угловой скоростью ω относительно оси (точки О на рисунке 1).

Выделим на лопасти элементарную площадку АВ шириной b и высотой dr на расстоянии r от оси вращения, на которую действует поток среды со скоростью v_s , в результате чего она перемещается со скоростью u . Разделим скорость движения среды

v_s на две составляющие в радиальном и тангенциальном направлениях, выражения которых с учетом знака угла α имеют соответствующий вид (рисунок 2):

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

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

и определим раздельно влияние каждой из составляющих v_{sr} и v_{su} на скорости движения среды.

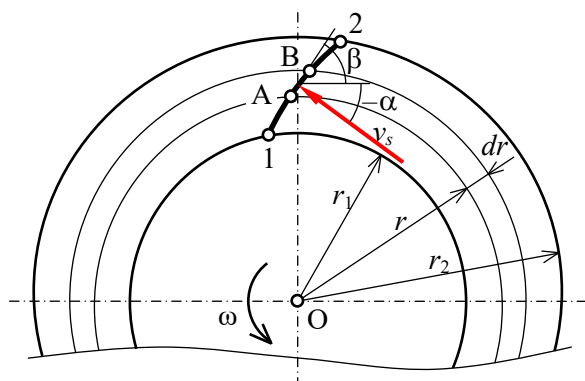


Рисунок 1. – Схема воздействия потока среды на лопасть

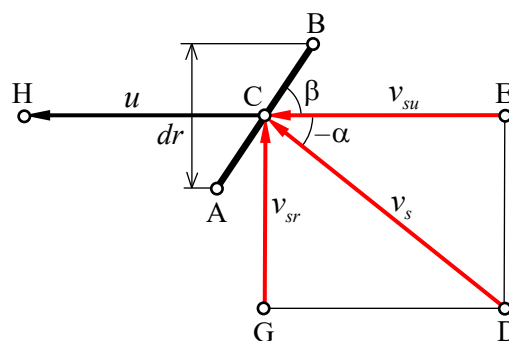


Рисунок 2. – Составляющие скорости воздействия среды на элементарную площадку лопасти

Воздействие среды, движущейся со скоростью v_{sr} в радиальном направлении от центра к периферии, рассмотрено в работе [3]. На элементарную площадку $b \cdot dr$ действует сила dF_{sr} , в результате чего возникает реакция лопасти dF' , направленная перпендикулярно плоскости площадки и представленная на рисунке 3 двумя составляющими dF'_r и dF'_u (синие линии). Так как турбина вращается равномерно, то реакция лопасти уравнивается соответствующими силами, равными по величине и противоположными по направлению (зеленые линии на рисунке 3) вышеуказанным силам. Кроме того, на среду действует сила dF'_w , направленная вдоль плоскости лопасти. Перечисленные силы на рисунке 3 взаимосвязаны. Сила dF_{sr} является геометрической суммой сил dF_r и dF_w , а сила dF' – геометрической суммой сил dF'_r и dF'_u .

Под воздействием перечисленных сил среда перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, со скоростью c' , в радиальном и тангенциальном направлениях – со скоростями c'_r и c'_u , вдоль лопасти – со скоростью w' (рисунок 4), которые как и соответствующие силы также геометрически взаимосвязаны. Под влиянием среды лопасть перемещается со скоростью u' , а под действием центробежной силы среда перемещается в радиальном направлении со скоростью c'_u . Выражения для определения перечисленных скоростей определены в [3] и с учетом принятых обозначений имеют вид:

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

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

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

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

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

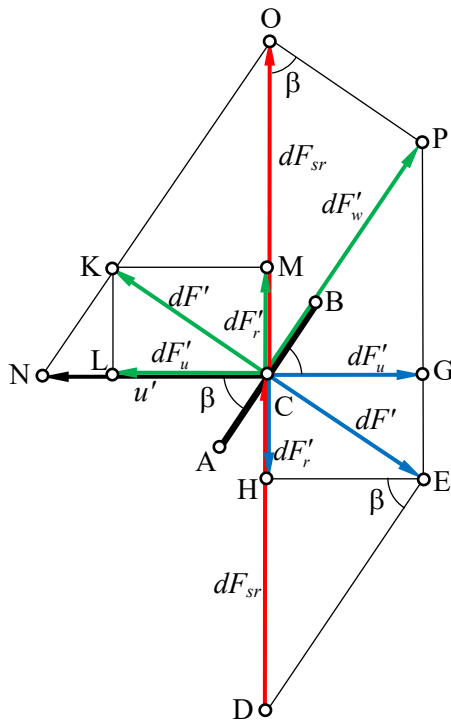


Рисунок 3. – Силы при радиальном воздействии среды на элементарную площадку

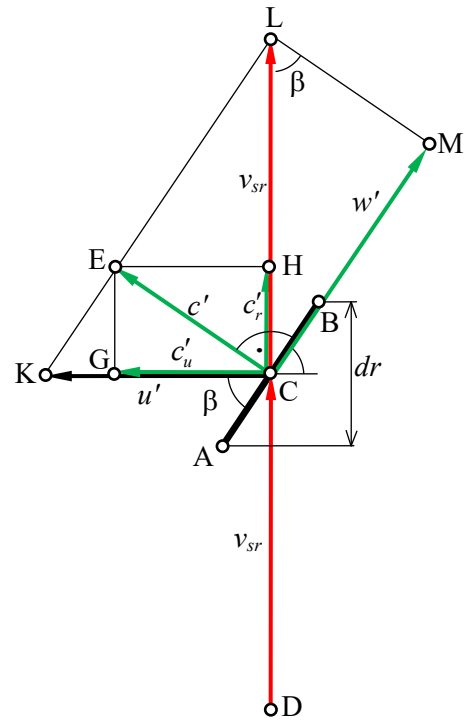


Рисунок 4. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием радиальной составляющей потока

Зависимости скоростей среды от окружной скорости турбины определяются выражениями [3]:

$$c' = u' \sin \beta; \quad (8)$$

$$c'_r = u' \sin \beta \cos \beta; \quad (9)$$

$$c'_u = c'_u = u' \sin^2 \beta; \quad (10)$$

$$w' = u' \frac{\sin^2 \beta}{\cos \beta}. \quad (11)$$

Давление среды на лопасть в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, а также в радиальном и тангенциальном направлениях выведены в работе [3] и определяются выражениями, видоизмененными в соответствии с принятыми обозначениями:

$$P' = \rho v_{sr}^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (12)$$

$$P'_r = \rho v_{sr}^2 \frac{\cos^4 \beta}{\sin^2 \beta}; \quad (13)$$

$$P'_u = \rho v_{sr}^2 \cos^2 \beta. \quad (14)$$

Соответствующие давления, выраженные через скорость турбины, определяются формулами:

$$P' = \rho (u')^2; \quad (15)$$

$$P'_r = \rho (u')^2 \cos^2 \beta; \quad (16)$$

Силы, изображенные на рисунке 5, взаимосвязаны. Сила dF_{su} является геометрической суммой сил dF'' и dF_w'' , а сила dF'' – геометрической суммой сил dF_r'' и dF_u'' . Под влиянием этих сил элементарный объем среды перемещается со скоростями: c'' – в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, c_r'' – радиально от оси вращения, c_u'' – в направлении окружной скорости, w'' – вдоль лопасти (рисунок 6). При этом, за счет относительного перемещения вдоль лопасти среда дополнительно перемещается в тангенциальном направлении со скоростью $w'' \cos \beta$ и в конечном итоге приобретает скорость v_{su} . Лопасть, из-за вытеснения средой, помимо скорости c_u'' также приобретает дополнительное перемещение и движется тангенциально с окружной скоростью u'' .

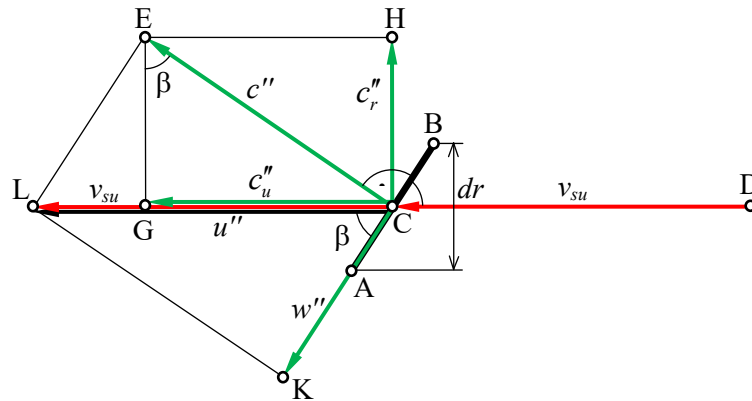


Рисунок 6. – Скорости движения элементарного объема среды и площадки под воздействием тангенциальной составляющей потока

Величины этих скоростей определяются выражениями соответственно:

$$c'' = v_{su} \sin \beta ; \quad (25)$$

$$c_r'' = c'' \cos \beta = v_{su} \sin \beta \cos \beta ; \quad (26)$$

$$c_u'' = c'' \sin \beta = v_{su} \sin^2 \beta ; \quad (27)$$

$$w'' = v_{su} \cos \beta ; \quad (28)$$

$$u'' = v_{su} . \quad (29)$$

Под действием центробежной силы среда перемещается в радиальном направлении со скоростью, равной скорости ее тангенциального движения, т.е.

$$c_r'' = v_{su} . \quad (30)$$

Часть энергии среды, пропорциональная силе dF_u'' , затрачивается на вращение турбины, а другая ее часть, пропорциональная силе dF_r'' , – только на преодоление сопротивления элементарной площадки лопасти и на вращение турбины влияния не оказывает. Энергия, создаваемая центробежной силой, расходуется на перемещение среды в радиальном направлении к периферии и в конечном итоге способствует снижению затрат энергии на привод турбины.

Определим давление среды при ее воздействии на элементарный участок лопасти. Примем, что за промежуток времени dt элементарный объем среды перемещается со скоростью c_r'' в радиальном направлении на расстояние dr . Величина этого промежутка времени равна

$$dt'' = \frac{dr}{c_r''} = \frac{dr}{v_{su} \sin \beta \cos \beta} . \quad (31)$$

За указанный промежуток времени dt'' элементарный объем перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, а также в радиальном и тангенциальном направлениях на расстояния:

$$ds'' = dt'' \cdot c'' = \frac{c_u''}{v_{su}} \frac{dr}{\sin^2 \beta \cos \beta} = \frac{dr}{\cos \beta}; \quad (32)$$

$$ds_r'' = dt'' \cdot c_r'' = \frac{c_u''}{v_{su}} \frac{dr}{\sin^2 \beta} = dr; \quad (33)$$

$$ds_u'' = dt'' \cdot c_u'' = \frac{c_u''}{v_{su}} \frac{dr}{\sin \beta \cos \beta} = dr \frac{\sin \beta}{\cos \beta}. \quad (34)$$

Энергия, передаваемая средой элементарной площадке лопасти в указанных выше направлениях, равна произведению сил в соответствии с формулами (21)-(23) на соответствующий путь перемещения по зависимостям (32)-(34):

$$dA'' = dF'' ds'' = \rho b (dr)^2 \frac{v_{su} c_u''}{\sin \beta \cos \beta}; \quad (35)$$

$$dA_r'' = dF_r'' ds_r'' = \rho b (dr)^2 v_{su} c_u'' \frac{\cos \beta}{\sin \beta}; \quad (36)$$

$$dA_u'' = dF_u'' ds_u'' = \rho b (dr)^2 v_{su} c_u'' \frac{\sin \beta}{\cos \beta}. \quad (37)$$

Давление среды на лопасть равно соответствующей энергии, отнесенной к единице перемещаемого элементарного объема среды, равного $dV'' = b \cdot ds_r'' \cdot ds_u''$, и в указанных выше направлениях с учетом выражений определяется формулами:

$$P'' = \frac{dA''}{dV''} = \rho \frac{v_{su} c_u''}{\sin^2 \beta} = \rho v_{su}^2; \quad (38)$$

$$P_r'' = \frac{dA_r''}{dV''} = \rho v_{su} c_u'' \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} = \rho v_{su}^2 \cos^2 \beta; \quad (39)$$

$$P_u'' = \frac{dA_u''}{dV''} = \rho v_{su} c_u'' = \rho v_{su}^2 \sin^2 \beta. \quad (40)$$

Первый и третий члены равенства (40) с учетом (29) аналогичны уравнению Эйлера. Формулы (38)-(40), в отличие от известного уравнения, более полно отражают влияние среды на лопасти турбины.

Давление, создаваемое центробежной силой, может быть определено по зависимости

$$P_u'' = \rho \frac{(c_u'')^2}{2} = \rho \frac{v_{su}^2}{2}. \quad (41)$$

Результирующие значения параметров работы радиальной турбины могут быть получены 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 α имеют вид:

$$c = c' + c'' = v_s \sin(\beta - \alpha); \quad (42)$$

$$c_r = c_r' + c_r'' = v_s \sin(\beta - \alpha) \cos \beta; \quad (43)$$

$$c_u = c'_u + c''_u = v_s \sin(\beta - \alpha) \sin \beta; \quad (44)$$

$$w = w'' - w' = v_s \cos(\beta - \alpha); \quad (45)$$

$$c_y = c'_y + c''_y = v_s (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta); \quad (46)$$

$$u = u' + u'' = v_s \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta}. \quad (47)$$

Относительные скорости w' и w'' противоположны по направлению, и положительное значение скорости w'' в зависимости (45) выбрано, исходя из совпадения направлений проекции этой скорости на касательную к окружности вращения и окружной скорости турбины u .

С учетом уравнения (47) скорости движения среды по формулам (42)-(46), выраженные через окружную скорость турбины, равны:

$$c = u \sin \beta; \quad (48)$$

$$c_r = u \sin \beta \cos \beta; \quad (49)$$

$$c_u = u \sin^2 \beta; \quad (50)$$

$$w = u \frac{\cos(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha)} \sin \beta; \quad (51)$$

$$c_y = u \frac{\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta}{\sin(\beta - \alpha)} \sin \beta. \quad (52)$$

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

$$P = P' + P'' = \rho v_s^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta}; \quad (53)$$

$$P_r = P'_r + P''_r = \rho v_s^2 \frac{\cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} (\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha); \quad (54)$$

$$P_u = P'_u + P''_u = \rho v_s^2 (\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha); \quad (55)$$

$$P_y = \rho \frac{v_s^2}{2} (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta)^2, \quad (56)$$

а выраженные через окружную скорость турбины u :

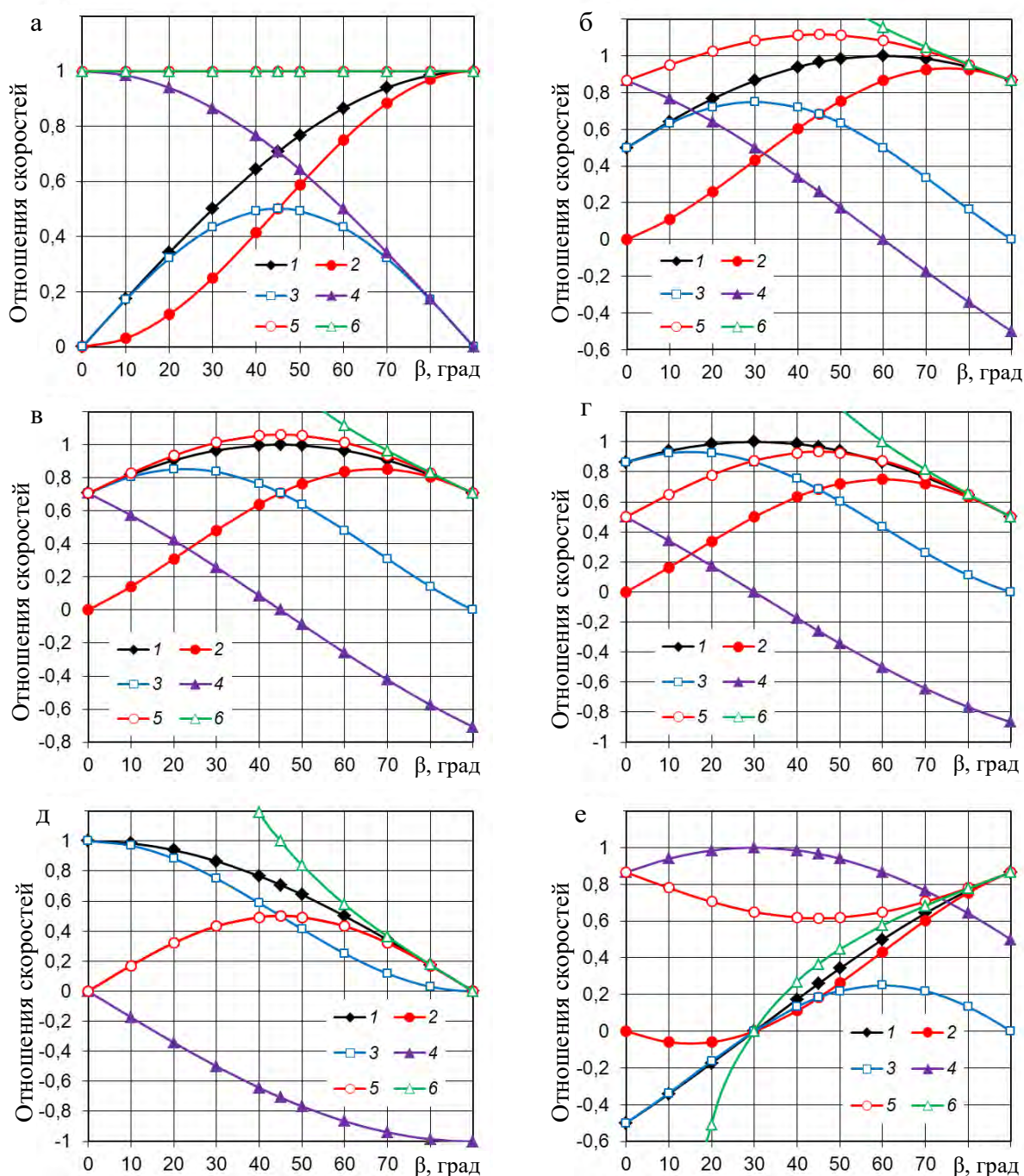
$$P = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)}; \quad (57)$$

$$P_r = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} \cos^2 \beta; \quad (58)$$

$$P_u = \rho u^2 \frac{\sin^2 \beta \cos^2 \alpha + \cos^2 \beta \sin^2 \alpha}{\sin^2(\beta - \alpha)} \sin^2 \beta; \quad (59)$$

$$P_y = \rho \frac{u^2}{2} \frac{(\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta)^2}{\sin^2(\beta - \alpha)} \sin^2 \beta. \quad (60)$$

Графические зависимости отношений скоростей в соответствии с формулами (42)-(47) к скорости движения среды v_s приведены на рисунке 7.



а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = -30^\circ$; в – $\alpha = -45^\circ$; г – $\alpha = -60^\circ$; д – $\alpha = -90^\circ$; е – $\alpha = 30^\circ$;

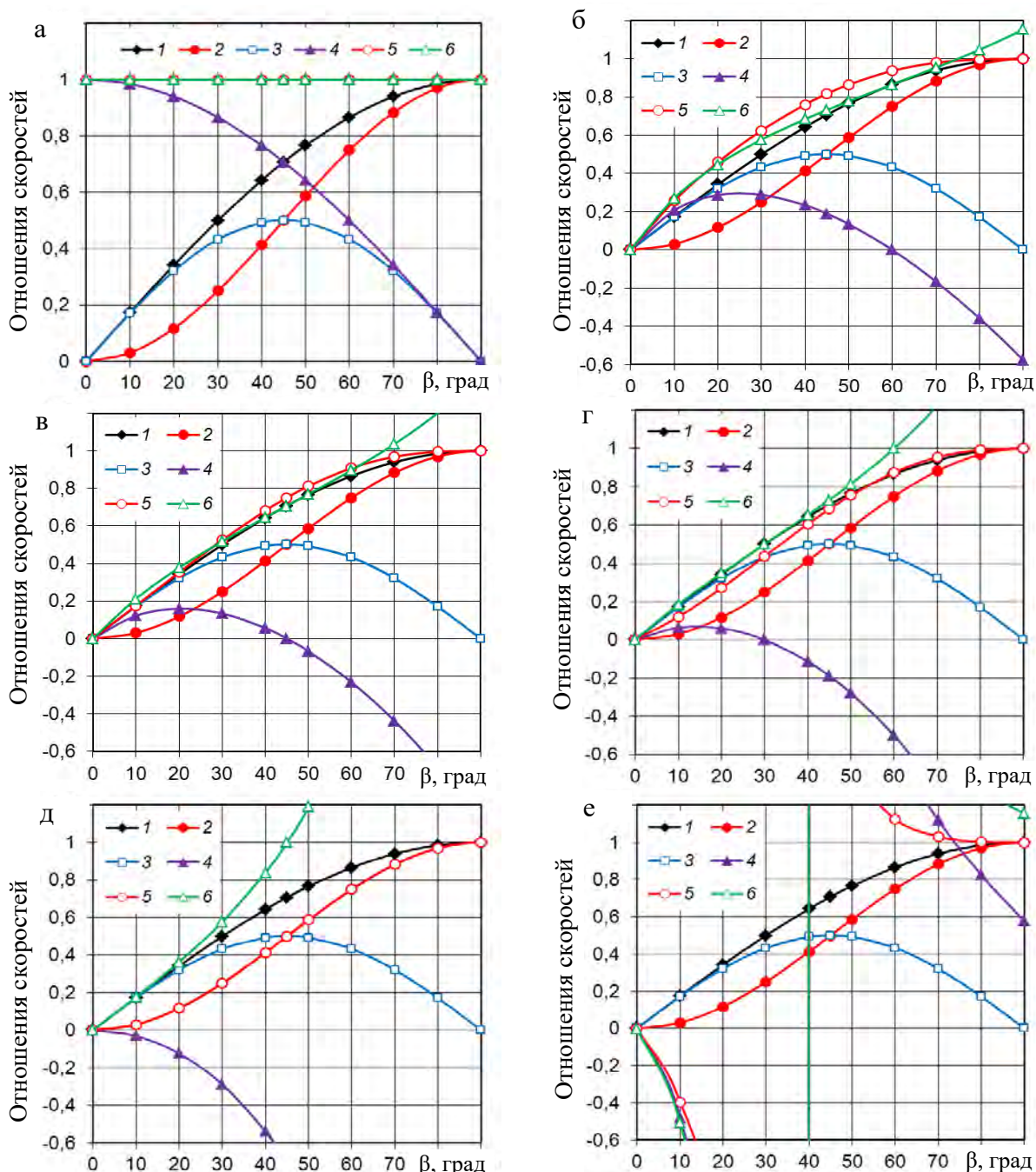
1 – c/v_s ; 2 – c_u/v_s ; 3 – c_r/v_s ; 4 – w/v_s ; 5 – c_u/v_s ; 6 – u/v_s

Рисунок 7. – Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей при различных углах α

Максимальное отношение скоростей c/v_s наблюдается при соотношении $\beta = 90^\circ - |\alpha|$, c_u/v_s – при $\beta = 90^\circ - |\alpha|/2$, а c_r/v_s – при $\beta = (90^\circ - |\alpha|)/2$. Отношение w/v_s непрерывно снижается при возрастании β , принимает нулевые значения при $\beta = 90^\circ - |\alpha|$ и в дальнейшем принимает отрицательные величины. Наибольшие окружные скорости имеют место для малых значений углов $|\alpha|$ и β . Независимо от угла α максимальная скорость движения среды под действием центробежной силы имеет место при $\beta = 45^\circ$. При этом она достигает своего наивысшего значения при $\alpha = -30^\circ$ (график 7б). В неко-

торых случаях она может быть равной входной скорости среды (рисунок 7а) или даже превышать ее (рисунок 7б и 7в).

Графическое изображение отношений скоростей в соответствии с формулами (48)-(52) приведено на рисунке 8.



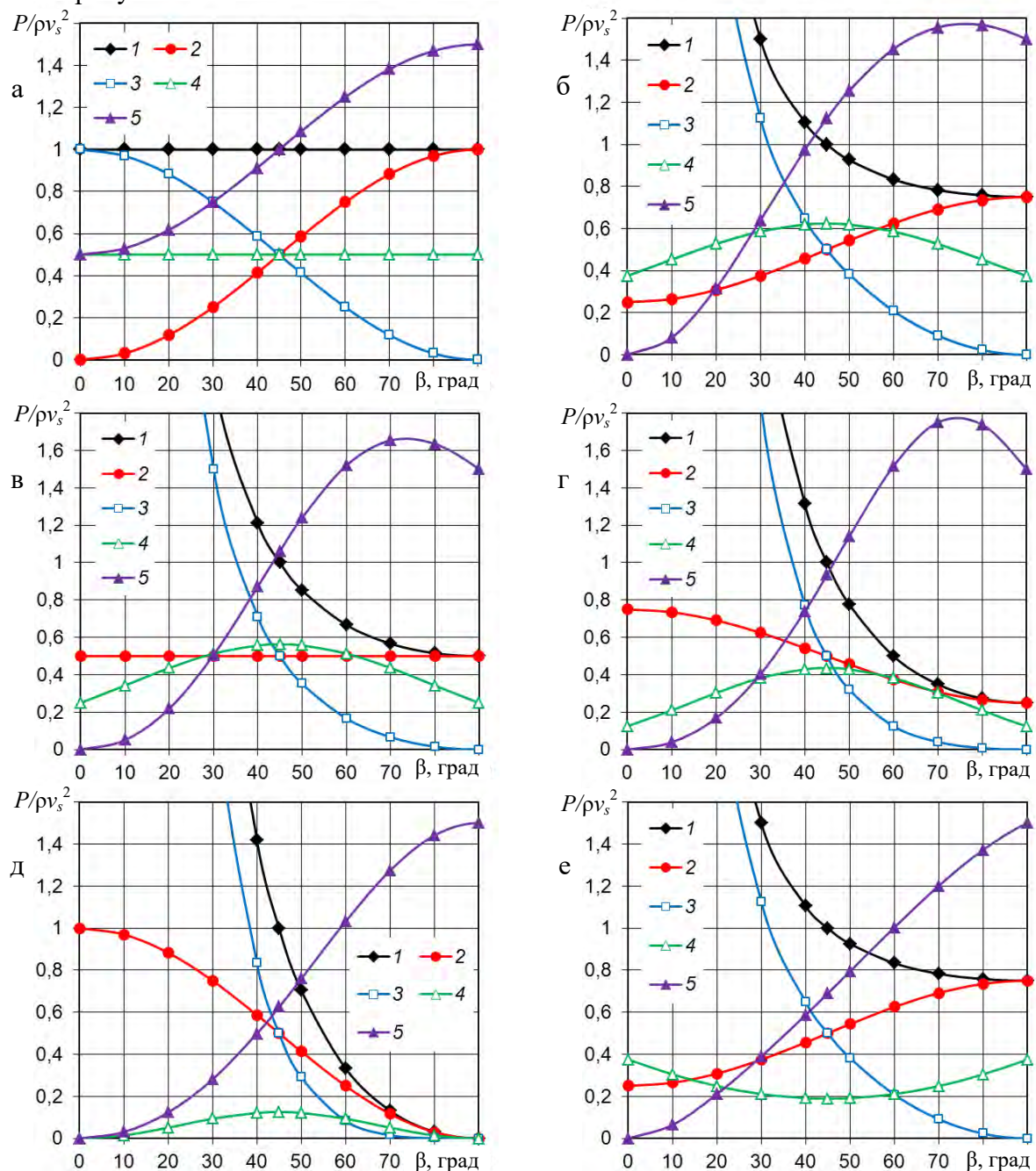
а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = -30^\circ$; в – $\alpha = -45^\circ$; г – $\alpha = -60^\circ$; д – $\alpha = -90^\circ$; е – $\alpha = 30^\circ$;
 1 – c/u ; 2 – c_u/u ; 3 – c_r/u ; 4 – w/u ; 5 – c_u/u ; 6 – v_s/u

Рисунок 8. – Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей при различных углах α

Отношения c/u , c_u/u и c_r/u не зависят от значения угла α , т.е. угол α влияет на эти скорости в одинаковой мере. По мере возрастания угла β отношения c/u и c_u/u непрерывно возрастают, а отношение c_r/u первоначально увеличивается, принимает максимальное значение при $\beta = 45^\circ$ и в дальнейшем снижается. С увеличением угла α по модулю отношения c_u/u и c_r/u сближаются и при $\alpha = -90^\circ$ совпадают, а отно-

шение v_s/u возрастает. Следовательно, для достижения приемлемых окружных скоростей турбины значения углов α и β должны быть небольшими. Относительная скорость $w = 0$ при направлении входного потока, перпендикулярном плоскости лопасти. На рисунках 7д и 8д кривые 2 и 5 совпадают, так как равенство $c_u = c_{\theta}$ следует из формул (44) и (46), а также (50) и (52) при $\alpha = -90^\circ$.

Графическое изображение отношений давлений по формулам (53)-(56) приведено на рисунке 9.



а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = -30^\circ$; в – $\alpha = -45^\circ$; г – $\alpha = -60^\circ$; д – $\alpha = -90^\circ$; е – $\alpha = 30^\circ$;

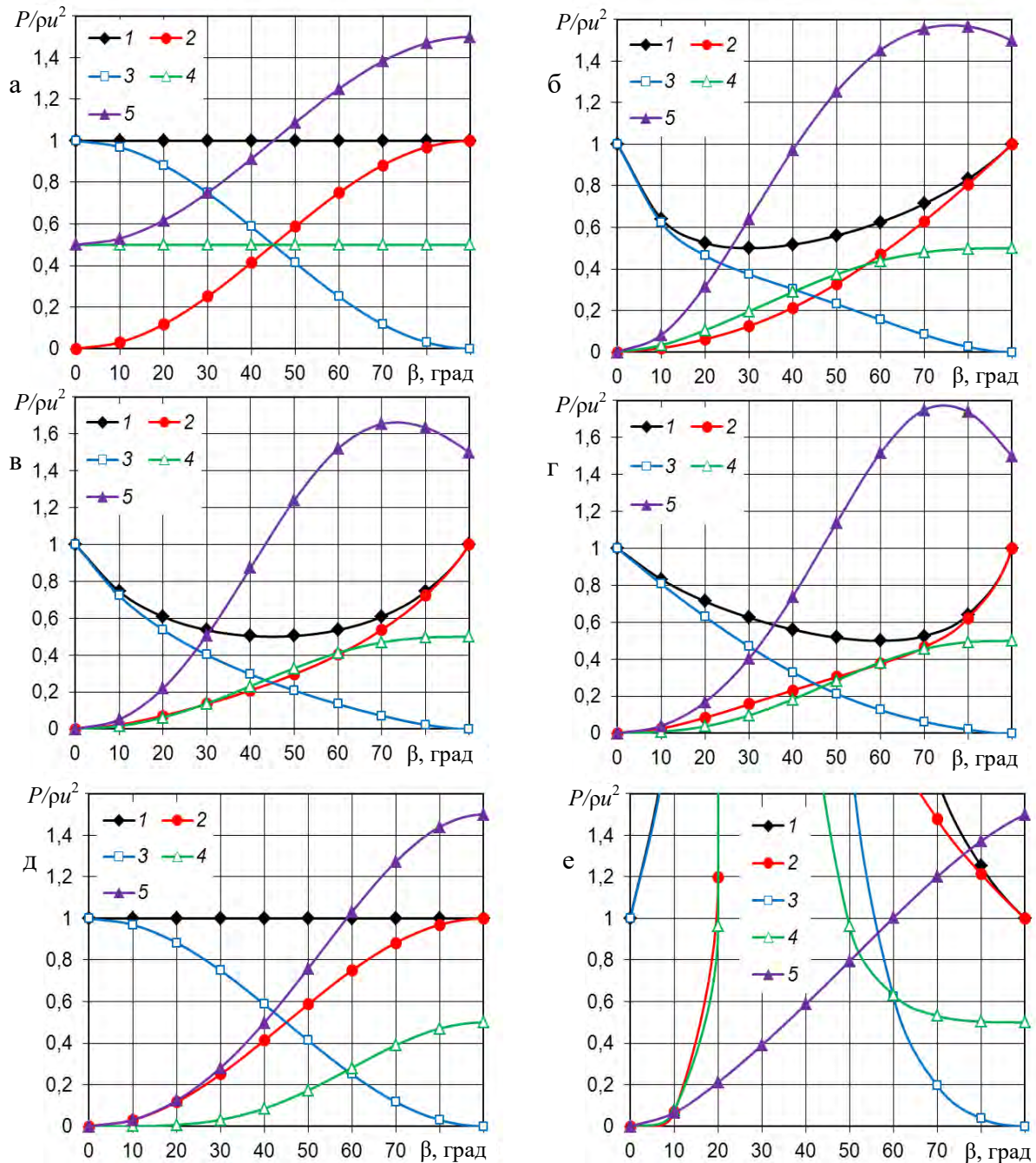
1 – $P/\rho v_s^2$; 2 – $P_u/\rho v_s^2$; 3 – $P_r/\rho v_s^2$; 4 – $P_u/\rho v_s^2$; 5 – $(P_u + P_r)/P$

Рисунок 9. – Зависимости давлений от угла наклона лопастей при различных углах α

При увеличении угла α отношения $P/\rho v_s^2$ и $P_r/\rho v_s^2$ возрастают для $\beta < 45^\circ$ и снижаются для $\beta > 45^\circ$. Отношение $P_u/\rho v_s^2$ при возрастании β увеличивается для

$|\alpha| < 45^\circ$ (график 9а и 9б), не изменяется для $|\alpha| = 45^\circ$ (график 9в), и уменьшается для $|\alpha| > 45^\circ$. Давление, создаваемое центробежной силой, при $\beta \approx 45^\circ$ сопоставимо с давлениями среды на лопасти в радиальном и тангенциальном направлениях за исключением больших величин углов α по модулю (график 9д) и частично компенсирует сопротивление лопастей движению среды. Влияние центробежной силы на работу турбины отражено на графике 9 кривой 5, отражающей отношение $(P_u + P_u)/P$, которое при больших углах β может превышать отношение $P/\rho v_s^2$.

Графическое изображение отношений давлений по формулам (57)-(60) приведено на рисунке 10.



а – $\alpha = 0^\circ$; б – $\alpha = -30^\circ$; в – $\alpha = -45^\circ$; г – $\alpha = -60^\circ$; д – $\alpha = -90^\circ$; е – $\alpha = 30^\circ$;

1 – $P/\rho u^2$; 2 – $P_u/\rho u^2$; 3 – $P_r/\rho u^2$; 4 – $P_u/\rho u^2$; 5 – $(P_u + P_u)/P$

Рисунок 10. – Зависимости давлений от угла наклона лопастей при различных углах α

Отношение $P/\rho u^2$ не зависит от угла наклона лопастей при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = -90^\circ$. Минимальные значения этого отношения, равные 0,5, наблюдаются при $\beta = |\alpha|$. По мере увеличения угла β энергия среды, передаваемая турбине, первоначально снижается, достигает минимального значения при $\beta = |\alpha|$, а затем – повышается. Поэтому для снижения удельной материалоемкости радиальной турбины целесообразно избегать равенства этих углов. При этом энергия, расходуемая на преодоление сопротивления лопастей, при увеличении β непрерывно увеличивается для $|\alpha| < 45^\circ$ и уменьшается для $|\alpha| > 45^\circ$. Отношение $P_u/\rho u^2$ постоянно при $\alpha = 0^\circ$ и возрастает при увеличении β .

Выводы

Максимальное отношение скоростей c/v_s наблюдается при соотношении $\beta = 90^\circ - |\alpha|$, c_u/v_s – при $\beta = 90^\circ - |\alpha|/2$, а c_r/v_s – при $\beta = (90^\circ - |\alpha|)/2$. При возрастании угла α по модулю снижается отношение окружной скорости турбины к начальной скорости среды. Увеличение угла α по модулю повышает отношения $P/\rho v_s^2$, $P_u/\rho v_s^2$ и $P_r/\rho v_s^2$ для $|\alpha| < 45^\circ$ и снижает их для $|\alpha| > 45^\circ$. Давление, создаваемое центробежной силой, имеет максимальные значения при $\beta = 45^\circ$ и сопоставимо с другими давлениями.

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.** Зависимость параметров центробежной турбины от угла наклона лопастей / В.Н. Павлечко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 35-43.

Перечень условных обозначений

A – работа, Дж;
 b – ширина лопасти, м;
 α – угол между вектором начальной скорости среды и направлением, обратным окружной скорости;
 β – угол между плоскостью лопасти и направлением, обратным окружной скорости, град;
 c – скорость среды в турбине, м/с;
 F – сила, Н;
 s – длина пути, м;
 P – давление, Па;
 t – время, с;
 r – радиус рабочего колеса, м;
 ρ – плотность среды, кг/м³;
 u – окружная скорость турбины, м/с;
 v – исходная скорость среды, м/с;
 w – относительная скорость среды, м/с.

Индексы:

r – радиальный;
 s – поток (stream), среда;
 u – тангенциальный;
 ω – центробежный.

Pavlechko V.N.

Functioning of the radial-flow turbine with whirling input flow

The dependence of certain parameters of the radial-flow turbine on the working fluid flow direction was stated. The equations to determine the fluid speed rate and the speed of the turbine blades and pressure generated by the fluid on the rotor blades depending on the blade angle and the fluid flow direction were derived. The formulas for calculation of the fluid flow rate under the centrifugal force and the pressure it generates were obtained. The characteristic curves of the fluid flow rate in the interblade space by the initial fluid flow rate and the peripheral speed of the rotor were graphically presented. The curves of the generalized pressure depending on the blade angle and the fluid flow direction were presented as well.

Keywords: radial-flow turbine, blade angle, flow direction, fluid flow rate, fluid pressure, centrifugal force.

Поступила в редакцию 12.03.2017 г.

УДК 661.152.022.51(045)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Лобко В.В. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь)

Рассматривается математическое моделирование системы управления измельчением руды, подаваемой в отделение измельчения и флотации обогатительной фабрики при производстве калийных удобрений.

Ключевые слова: математическое моделирование, система автоматического управления измельчительным комплексом.

Введение

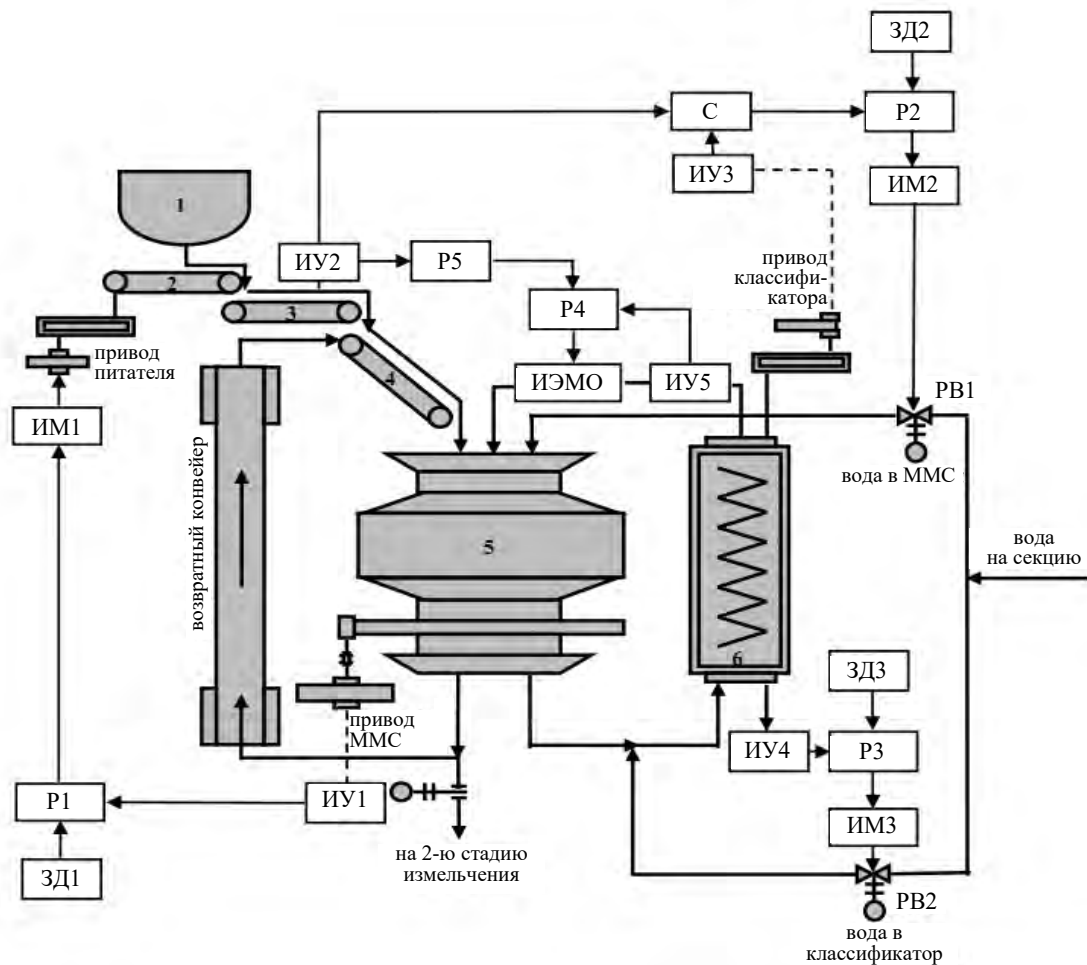
Процессы переработки рудного сырья занимают особое место на горно-обогатительных комбинатах Беларуси и за рубежом. Важную роль при производстве минеральных удобрений занимает измельчение добытой руды. Измельчение руды характеризуется большой энергоемкостью – примерно 50 % энергии от общих энергозатрат горнорудного комбината. Процесс измельчения производится в солемельницах за счет ударного воздействия. Снижение энергоемкости технологического процесса измельчения является важной производственной задачей на горно-обогатительных предприятиях. Решение такой задачи возможно средствами автоматизации и управления технологическими процессами [1]. Одним из способов является разработка системы управления измельчительным комплексом, содержащим устройство для импульсной электромагнитной обработки руды, которое позволяет повысить производительность работы солемельницы.

1. Технологический процесс измельчения

Объектом исследований является измельчительный комплекс технологического процесса измельчения на флотационной обогатительной фабрике. Структурная схема измельчительного комплекса изображена на рисунке 1. Бункер 1 имеет специальное окно для выпуска руды диаметром 300 мм, прошедшей процесс дробления, на пластинчатый питатель 2. Далее руда, пройдя через горизонтальный 3 и наклонный 4 конвейеры, подается в мельницу мокрого самоизмельчения (ММС) 5. Мельница работает в замкнутом цикле с классификатором 6, обеспечивающим возврат неизмельченного продукта (песков) обратно в мельницу. Дробленая руда при измельчении и классификации доводится до фракций менее 1,1 мм. В процессе электромагнитной обработки руды меняется степень измельчаемости материала.

2. Разработка математической модели измельчительного комплекса как объекта управления

Математическое моделирование по сравнению с физическим вносит гибкость, достоверность и быстроту. Рассмотрим составление моделей отдельных компонентов измельчительного комплекса, используя структурную схему, приведенную на рисунке 1.



1 – бункер руды; 2 – пластинчатый питатель; 3 – горизонтальный конвейер;
 4 – наклонный конвейер; 5 – мельница ММС; 6 – классификатор;
 ИЭМО – устройство импульсной электромагнитной обработки руды;
 P1, ... , P5 – регуляторы; PB1, PB2 – регулирующие устройства расхода воды;
 C – сумматор; ИУ – измерительные устройства; ИМ – исполнительные механизмы;
 ЗД – блоки задания управляющих сигналов
 Рисунок 1. – Структурная схема измельчительного комплекса

2.1. Модель конвейера. Руда в мельницу подается по наклонному конвейеру, который характеризуется величиной запаздывания t_{zan} , поэтому потоки на входе и выходе связаны соотношением:

$$Q_{ex}(t_{zan}) = Q_{вых}(t), \quad (1)$$

передаточная функция конвейера [2]:

$$W_{конв}(p) = \frac{Q_{вых}(p)}{Q_{ex}(p)}, \quad (2)$$

где p – постоянная Лапласа.

2.2. Модель мельницы самоизмельчения руды. Если мельница самоизмельчения работает в незамкнутом цикле, то связь между ее заполнением и производительностью по исходной руде, согласно [3], будет иметь вид:

$$kQ_{\text{вх}} = T\varphi, \quad (3)$$

где k – коэффициент передачи мельницы по каналу управления «расход руды $Q_{\text{вх}}$ – заполнение φ »;

T – период времени заполнения объема бункера 1 солемельницы 5 (рисунок 1);

φ – заполнение бункера солемельницы, %.

В динамическом отношении стержневую мельницу можно охарактеризовать как соединение двух звеньев линейного инерционного звена с передаточной функцией $W(p)$ и нелинейного безинерционного. Передаточная функция $W(p)$ описывается устойчивым аperiodическим звеном первого порядка с запаздыванием τ :

$$W(p) = \frac{G_m(p)}{Q_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{Tp-1} e^{-\tau p}, \quad (4)$$

где G_m – величина внутримельничного объема заполнения рудой.

2.3. Модель классификатора. Слив мельницы поступает на классификатор 6 (рисунок 1), который представляется двумя звеньями: усилительным и звеном запаздывания. Классификатор делит поток на две части: на готовый продукт и пески, которые поступают обратно в мельницу.

Передаточная функция по расходу руды представлена аperiodическим звеном чистого запаздывания:

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{V_{\text{вых.кл}}(p)}{Q_{\text{вх.кл}}(p)} = e^{-\tau p}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{вх.кл}}(p)$ – расход руды на входе классификатора;

$V_{\text{вых.кл}}(p)$ – объем руды на выходе классификатора.

2.4. Модель мельницы с устройством импульсной электромагнитной обработки руды. Расход неизмельченной, возвращаемой в мельницу руды (песков), обладает более низкой измельчаемостью, по сравнению с исходной рудой. Величина расхода песков оценивается по коэффициенту относительной измельчаемости $k_{\text{изм}}$:

$$k_{\text{изм}} = \frac{q_1}{q_2}, \quad (6)$$

где q_1 – удельная производительность мельницы с применением устройства импульсной электромагнитной обработки руды (ИМЭО);

q_2 – удельная производительность мельницы без применения устройства ИМЭО.

Удельная производительность мельницы по объему готового продукта определяется по формуле:

$$q = \frac{P_n}{tV}, \quad (7)$$

где P_n – масса измельченного продукта, т;

V – объем мельницы, м^3 ;

t – время измельчения, мин.

Передаточная функция мельницы примет вид:

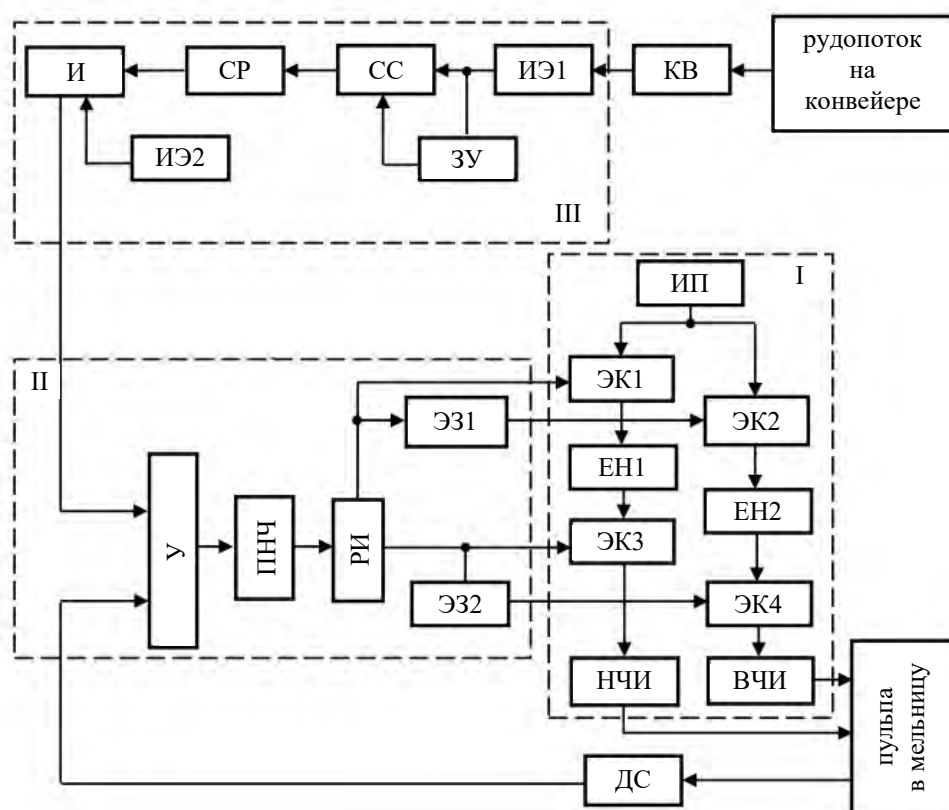
$$W(p) = \frac{k / k_{изм}}{Tp - 1} e^{-\tau p}. \quad (8)$$

Математическая модель измельчительного комплекса, как объекта управления, включает в себя следующие компоненты:

- модель конвейера;
- модель мельницы мокрого самоизмельчения;
- модель классификатора;
- модель ИМЭО.

3. Принцип работы системы автоматического управления процессом электромагнитной обработки руды

От источника питания ИП (рисунок 2), через электромагнитный ключ ЭК1, происходит заряд емкостного накопителя ЕН1, а через элемент Э31, в котором задается время, и ключ ЭК2 – заряд накопителя ЕН2.



И – установка электромагнитной обработки; II – регулятор частоты следования импульсов; III – регулятор количества импульсов; И – интегратор; СР – сигнум-реле; СС – схема сравнения; КВ – конвейерные весы; ИЭ1, ИЭ2 – импульсные элементы; ЗУ – запоминающее устройство; ЕН1, ЕН2 – емкостные накопители; ЭК1, ..., ЭК4 – электронные ключи; ПНЧ – преобразователь напряжения в частоту следования импульсов; ИП – источник питания; РИ – распределитель импульсов; НЧИ – низкочастотный индуктор; ВЧИ – высокочастотный индуктор; Э31, Э32 – элементы задержки; ДС – датчик скорости потока пульпы

Рисунок 2. – Структурная схема системы автоматического управления электромагнитной обработки руды

При достижении максимального зарядного напряжения, накопитель ЕН1 разряжается через ключ ЭК3 на низкочастотный индуктор НЧИ. При прохождении пульпы через индуктор на пульпу воздействует электромагнитное поле. ЕН2 разряжается на индуктор ВЧИ через ЭК4, управляемый элементом задержки ЭЗ2.

На руду одновременно воздействуют электромагнитные поля, создаваемые НЧИ и ВЧИ. В процессе перемещения пульпы по трубопроводу осуществляется измерение скорости пульпы датчиком ДС. Для обеспечения стабилизации режима электромагнитной обработки руды в зависимости от скорости пульпы сигнал с ДС подают на усилитель У, с выхода которого сигнал поступает на преобразователь напряжения в частоту следования импульсов ПНЧ. Далее импульсный сигнал поступает на вход распределителя импульсов РИ. С выхода РИ – по четырем цепям к входам ЭК1, ЭК3, обеспечивающих заряд ЕН1, включение НЧИ. Управление зарядом ЕН2 и разрядом на ВЧИ осуществляется через элементы ЭЗ1, ЭЗ2. При изменении текущего значения скорости пульпы изменяется время ожидания запуска индукторов НЧИ, ВЧИ и время заряда ЕН1, ЕН2 за счет изменения частоты следования импульсов ПНЧ, а следовательно, и распределителя РИ. По окончании работы индуктора ВЧИ, процесс заряда ЕН1, ЕН2 повторяется.

Заключение

В статье рассматривается моделирование системы автоматического управления измельчительным комплексом в технологическом процессе измельчения калийной руды. Приведены отдельные модели компонентов системы управления. Рассматривается работа системы автоматического управления электромагнитной обработки руды.

Список использованных источников

1. **Самхарадзе, Т.Г.** Обзор результатов решений научных задач / Т.Г. Самхарадзе // Промышленные контроллеры и АСУ. – 2014. – № 12. – С. 48-60.
2. **Козин, В.З.** Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках / В.З. Козин, А.Е. Троп, А.Я. Комаров. – М.: Недра, 1980. – 336 с.
3. **Марюта, А.Н.** Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А.Н. Марюта, Ю.Г. Качан, В.А. Бунько. – М.: Недра, 1983. – 277 с.

Labko V.W.

Mathematical modeling of ore crushing control system by the potash fertilizers manufacturing

The article considers mathematical modeling of ore crushing control system of potash fertilizers manufacturing when the ore is supplied to the reduction and flotation workshop of the beneficiation plant.

Keywords: mathematical modeling, crushing complex automatic control system.

Поступила в редакцию 28.08.2017 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 541.6:678.6

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ МЕТАСИЛИКАТОВ
НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРОВ**

Шаповалов В.М., Тимошенко В.В. (ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь), Злотников И.И. (УО «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, Беларусь), Тартаковский З.Л. (Институт инженерии материалов Западно-Померанского технологического университета, г. Щецин, Польша), Пантюхов О.Е., Талецкий В.В. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

Исследовано влияние высокодисперсных силикатных наполнителей (промышленно выпускаемых метасиликатов металлов и кремневой кислоты) на механические свойства полимеров (полиэтилен низкого давления и фенолоформальдегидная смола), а также процессы, происходящие в полимерах при нагревании. Показано, что введение высокодисперсных метасиликатов в полимерную матрицу позволяет управлять процессами, протекающими в полимерных композиционных материалах при их нагревании, и повышать такие важные параметры, как стойкость к термической и термоокислительной деструкции, а также теплостойкость и механическую прочность.

Ключевые слова: полимеры, наполнители, метасиликаты, полимерные композиционные материалы.

Введение

Разработка новых полимерных композиционных материалов невозможна без использования высокодисперсных минеральных наполнителей, что является традиционным эффективным способом направленного управления свойствами полимеров. Введением этих наполнителей можно регулировать механические, теплофизические, электрические, магнитные, оптические свойства полимеров. Очень широко в качестве таких наполнителей используются различные синтетические и природные силикаты: диоксид кремния, силикагели, кварц, каолин, глины, слюда и многие другие [1, 2]. Особенный интерес представляют силикатные наполнители в высокодисперсном состоянии, так как наполнение такими порошками даже при их низком содержании позволяет получать композиционные материалы на основе различных полимеров с уникальными свойствами, достичь которых при наполнении порошками грубого размола практически невозможно [3-5]. Наиболее важными показателями полимерных композиционных материалов, кроме механической прочности, являются их теплостойкость, определяемая, в первую очередь, температурой плавления полимера, а также стойкость к тепловому старению, связанная с устойчивостью макромолекул полимера к термической и термоокислительной деструкции.

В связи с этим, целью данных исследований явилось изучение влияния высокодисперсных метасиликатов металлов на механическую прочность некоторых полимеров и процессы, происходящие в них при воздействии температуры, в первую очередь, плавление, термоокисление и термодеструкция.

Объекты и методы исследования

В качестве полимеров были выбраны полиэтилен низкого давления (ПЭНД), как один из самых распространенных термопластов и термореактивный полимер – резольная фенолоформальдегидная смола (ФФС) марки СФ 342, широко применяемая при изготовлении полимерных композиционных материалов. В качестве силикатных наполнителей использовали промышленно выпускаемые метасиликаты: алюминия – $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$, бария – BaSiO_3 , железа – $\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$, кадмия – CdSiO_3 , магния – MgSiO_3 , марганца – MnSiO_3 , меди – CuSiO_3 , свинца – PbSiO_3 и цинка ZnSiO_3 , а также кремневую кислоту $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ с содержанием H_2O 20-22 мас. %. Перед изготовлением образцов порошки метасиликатов подвергали дополнительному размолу и во всех экспериментах использовали фракцию с размером частиц не более 50 мкм.

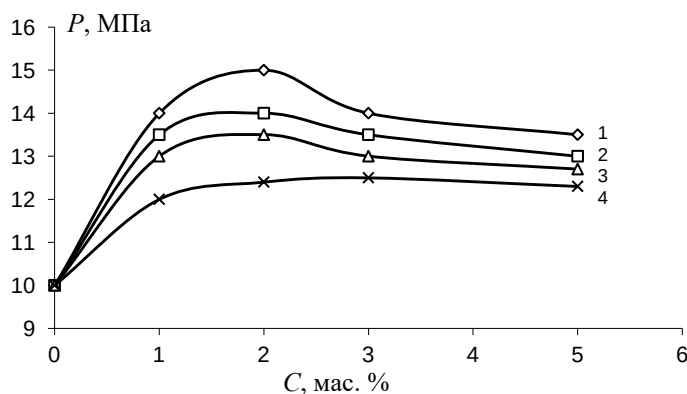
Образцы на основе ПЭНД в виде ленты получали методом экструзии на одношнековом экструзиографе «Reochord 90» фирмы «НААКЕ» (Германия) при температуре по зонам: I – 120 ± 5 °C, II – 140 ± 5 °C, III – 160 ± 5 °C, IV – 180 ± 5 °C. Композиции для изготовления ленты получали механическим смешением компонентов. Образцы на основе ФФС получали смешением в смесителе порошков смолы и силикатов. Из полученной смеси готовили цилиндрические образцы методом горячего прессования при температуре 180 ± 5 °C и давлении 50 ± 5 МПа. Время выдержки в пресс-форме – 1 мин на 1 мм толщины изделия.

Определение разрушающего напряжения при растяжении и сжатии 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, а также методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на микрокалориметре ДСМ-2М. 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 [6].

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рисунке 1 представлены результаты испытания механических свойств ПЭНД в зависимости от процентного содержания силикатов в полимере. Как следует из приведенных данных, максимум механической прочности полимерного композита достигается при содержании исследуемых наполнителей в пределах 1,5-2,0 мас. %.

В то же время интенсивность возрастания прочности для исследуемых композитов не одинакова. В таблице 1 приведены значения разрушающего напряжения при растяжении для всех исследуемых метасиликатов при установленной оптимальной концентрации наполнителя в композите – 2 мас. %. Данные таблицы свидетельствуют, что наименьшее влияние на механическую прочность ПЭНД оказывает чистый диоксид кремния (кремневая кислота), улучшая этот показатель на 22,7 %, в сравнении с ненаполненным полимером. Введение в полимер других силикатов способствует более интенсивному возрастанию прочности композитов – на 27,8-48,5 %. При этом для композитов с CuSiO_3 этот показатель достигает максимального значения – 15,0 МПа. Это указывает, по-видимому, на проявление частицами метасиликатов металлов большей химической активности в композиционной системе по сравнению с чистым диоксидом кремния.



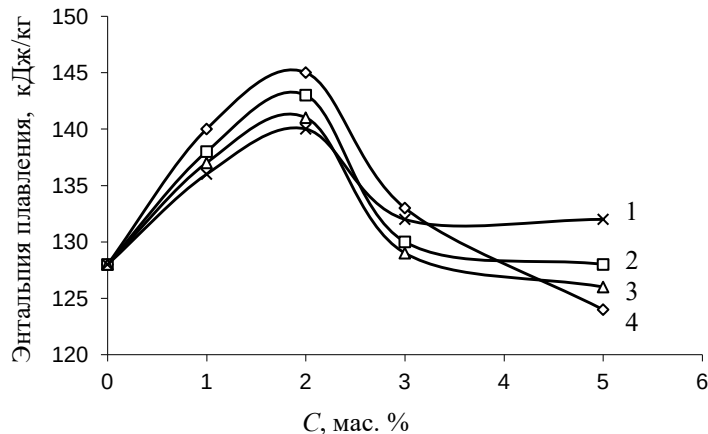
1 – CuSiO₃; 2 – Fe₂(SiO₃)₃;
3 – Al₂(SiO₃)₃; 4 – SiO₂·nH₂O

Рисунок 1. – Зависимость разрушающего напряжения при растяжении ПЭНД от концентрации силикатов в полимере

Таблица 1. – Разрушающее напряжение при растяжении композитов на основе ПЭНД

Наполнитель, 2 мас. %	P, МПа
Al ₂ (SiO ₃) ₃	13,5
BaSiO ₃	13,0
Fe ₂ (SiO ₃) ₃	14,0
CdSiO ₃	13,2
MgSiO ₃	13,4
MnSiO ₃	13,8
CuSiO ₃	15,0
PbSiO ₃	13,6
ZnSiO ₃	14,2
SiO ₂ ·nH ₂ O	12,4
без наполнителя	10,1

На рисунке 2 приведены зависимости энтальпии плавления ПЭНД от процентного содержания кремнеземов. Экстремальная зависимость энтальпии плавления ПЭНД с увеличением содержания силикатов свидетельствует и об экстремальной зависимости степени кристалличности полимера, что обусловлено структурирующим действием мелкодисперсных частиц наполнителя, выступающих в роли центров кристаллизации в области низких концентраций (до 2 мас. %)



1 – CuSiO₃; 2 – Fe₂(SiO₃)₃; 3 – Al₂(SiO₃)₃; 4 – SiO₂·nH₂O

Рисунок 2. – Зависимость энтальпии плавления ПЭНД от содержания силикатов

и, наоборот, оказывающих аморфизирующее действие на полимерную матрицу при более значительном их содержании.

Как и в случае с механической прочностью, для вводимых в полимер различных метасиликатов характерно отсутствие принципиального различия их влияния на теплоту плавления полимерной матрицы. Более экстремальное значение этого показателя при использовании в компози-

ции чистого диоксида кремния можно объяснить более высокой дисперсностью и развитой поверхностью частиц диоксида кремния по сравнению с частицами метасиликатов металлов, что приводит к необходимости дополнительного смачивания поверхности частиц. В результате этого он сильнее аморфизирует полимер. Описанное влияние высокодисперсных метасиликатов на протекание физико-химических процессов в полимерных композиционных материалах следует учитывать при их разработке, так как степень кристалличности полимеров оказывает существенное влияние на их физико-механические свойства.

Для термореактивного полимера ФФС изучено влияние высокодисперсных метасиликатов на энтальпию отверждения смолы (таблица 2). Установлено, что природа метасиликатов слабо влияет на изменение энтальпии отверждения смолы. При этом в области малых концентраций наполнителя в полимерной матрице изменение энтальпии отверждения более заметно. Показано, что существенное снижение энтальпии отверждения наблюдается только при введении в ФФС чистого диоксида кремния.

Таблица 2. – Влияние наполнителей на теплоту отверждения ФФС

Наполнитель	Теплота отверждения ФФС, кДж/кг, при различном содержании метасиликатов	
	1 мас. %	5 мас. %
$\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$	346	345
BaSiO_3	345	341
$\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$	344	340
CdSiO_3	345	344
MgSiO_3	345	342
MnSiO_3	344	340
CuSiO_3	342	340
PbSiO_3	343	340
ZnSiO_3	344	340
$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	310	306
без наполнителя	348	

Наблюдаемые эффекты можно объяснить следующим образом. Известно, что все силикаты обладают развитой поверхностью, покрытой силанольными ОН-группами [2, 7]. При введении метасиликатов в ФФС происходит хемоадсорбционное взаимодействие между силанольными группами на поверхности силикатов и ОН-группами смолы, при этом часть ОН-групп смолы оказывается блокированными, что несколько снижает теплоту отверждения. В чистом диоксиде кремния содержание гидроксильных групп превышает их содержание в метасиликатах, и при его совмещении с ФФС происходит более активное взаимодействие между ОН-группами смолы и наполнителя. В результате теплота отверждения получаемого продукта оказывается более низкой, чем исходной смолы и смолы, наполненной метасиликатами.

Результаты ДТА и ТГА показали, что введение исследуемых метасиликатов в ПЭНД и ФФС приводит к повышению температуры начала термоокислительной деструкции обоих полимеров (таблица 3), причем у ФФС этот эффект выражен более значительно, чем у ПЭНД.

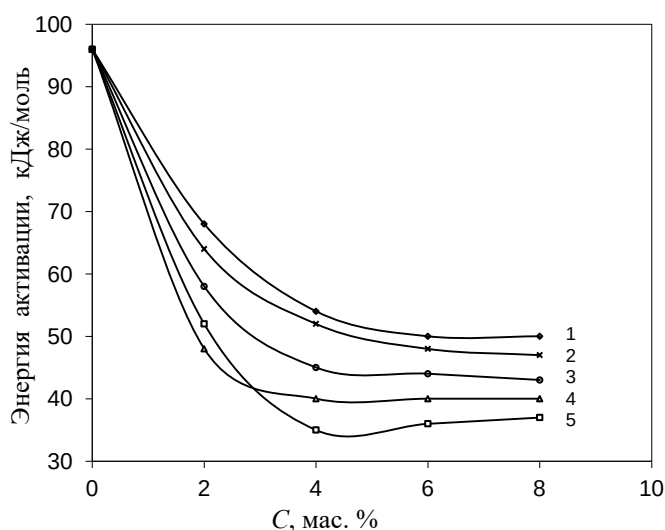
Повышение термостойкости ПЭНД можно объяснить адсорбционной составляющей силикатных частиц, имеющих пористую структуру и разветвленную поверхность на продуктах термоокислительной деструкции. Известно [8, 9], что полимеры окисляются по механизму цепных реакций, при этом образующиеся продукты термоокисления способствуют ускорению термоокислительной деструкции. Поэтому связывание этих продуктов частицами наполнителя на начальной стадии термоокисления приводит к повышению температуры начала термодеструкции термопластов. Кроме того, ионы переходных металлов, взаимодействуя с продуктами термоокисления полимеров, могут образовывать стабильные комплексы, снижающие скорость реакции [8].

Таблица 3. – Влияние наполнителей на термостойкость полимеров

Наполнитель, 5 мас. %	Температура начала потери массы полимера, К	
	ПЭНД	ФФС
$\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$	538	623
BaSiO_3	528	618
$\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$	533	615
CdSiO_3	526	620
MgSiO_3	532	623
MnSiO_3	528	625
CuSiO_3	523	615
PbSiO_3	513	518
ZnSiO_3	518	523
$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	528	520
без наполнителя	503	593

Повышение термостойкости ФФС обусловлено хемоадсорбционным взаимодействием фенольных и метилольных ОН-групп ФФС с силанольными ОН-группами на поверхности силикатных наполнителей. В пользу этого факта говорят изменения в ИК спектрах ФФС при ее наполнении метасиликатами и особенно кремневой кислотой. Так после введения в ФФС 5 мас. % кремневой кислоты с последующей термообработкой при 433 К в ИК спектрах смолы обнаружено появление двойной полосы поглощения с максимумами в области около 990 и 1100 см^{-1} , характерными для связи $\text{Si} - \text{O} - \text{C}$ полиорганосилоксанов, и исчезновение полосы поглощения ОН-групп фенола (1370 см^{-1}) [10, 11].

Энергия активации термоокислительной деструкции для двух исследованных полимеров ведет себя противоположным образом после введения метасиликатов: для ПЭНД она уменьшается (рисунок 3), а для ФФС увеличивается (таблица 4).



1 – $\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$; 2 – $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$; 3 – CuSiO_3 ;
4 – ZnSiO_3 ; 5 – $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Рисунок 3. – Зависимость энергии активации термоокислительной деструкции ПЭНД от содержания метасиликатов

Таблица 4. – Влияние наполнителей на энергию активации термоокислительной деструкции ФФС

Наполнитель, 5 мас. %	Энергия активации, кДж/моль
$\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$	122
BaSiO_3	115
$\text{Fe}_2(\text{SiO}_3)_3$	116
CdSiO_3	128
MgSiO_3	115
MnSiO_3	120
CuSiO_3	125
PbSiO_3	160
ZnSiO_3	112
$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	155
без наполнителя	103

Уменьшение энергии активации термоокислительной деструкции ПЭНД можно объяснить следующим образом. Термоокисление – это реакция между твердым, частично кристаллическим полимером и газом. Для ее протекания необходима непрерывная диффузия кислорода в полимер. Введение в ПЭНД высокодисперсных силикатов, обладающих большой удельной поверхностью и пористостью, приводит к снижению степени кристалличности и разрыхлению полимера, что значительно ускоряет диффузию кислорода в объем материала и облегчает его термоокисление.

Таким образом, введение в ПЭНД дисперсных метасиликатов оказывает двойственное влияние на его стойкость к термоокислительной деструкции: с одной стороны температура начала деструкции возрастает, но с другой стороны понижается энергия активации термоокислительной деструкции. В результате этого наполнение ПЭНД метасиликатами увеличивает его стойкость к кратковременному возрастанию температуры в случае, когда силикаты играют роль ингибиторов, связывая продукты термоокисления. Однако при длительном воздействии температуры термодеструкционные процессы в наполненном полимере приводят к более глубоким и необратимым изменениям.

Как следует из таблицы 4, эффективная энергия активации термоокислительной деструкции ФФС после введения в нее метасиликатов в количестве 5 мас. % имеет тенденцию к повышению этого показателя. Такое положение обусловлено способностью метасиликатов к химическому взаимодействию с ФФС, в результате которого в отвержденной смоле значительно уменьшается количество диметилэфирных связей, поскольку часть метилольных групп смолы взаимодействуют при отверждении не друг с другом, а с силанольными группами силикатных модификаторов. Поэтому в отвержденной модифицированной смоле увеличивается количество связей фениленового и дифенилоксидного типов, отличающихся более высокой термостойкостью.

Заключение

Таким образом, введение частиц высокодисперсных метасиликатов в полимерную матрицу (ПЭНД, ФФС) позволяет изменять физико-химические процессы, протекающие в полимерных композиционных материалах при их нагревании, и обеспечивает регулирование их механической прочности, стойкости к термической и термоокислительной деструкции, а также теплостойкости композита. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при анализе процессов структурообразования в наполненных полимерных системах и создании новых полимерных композиционных материалов различного функционального назначения.

Список использованных источников

1. Физика композиционных материалов: в 2 т. / Н.Н. Трофимов [и др.]. – М.: Мир, 2005. – 456 с.
2. Наполнители для полимерных композиционных материалов / Под ред. Г.С. Каца и Д.В. Милевски. – М.: Химия, 1981. – 736 с.
3. **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.
4. Полимер-силикатные нанокомпозиты: физико-химические аспекты синтеза полимеризацией *in situ* / С.Н. Чвалун [и др.] // Российский химический журнал. – 2008. – Т. 52, № 5. – С. 52-57.

5. **Кириллина, Ю.В.** Влияние способа смешения компонентов на свойства полимер-силикатного композиционного материала / Ю.В. Кириллина, С.А. Слепцова, Д. Хо-Чо // Арктика XXI век. Технические науки. – 2013. – № 1. – С. 13-26.
6. Изделия полимерные для строительства. Метод определения долговечности по энергии активации термоокислительной деструкции полимерных материалов: СТБ 1333.0-2002. – Минск: Минстройархитектуры, 2002. – 11 с.
7. **Чукин, Г.Д.** Химия поверхности и строение дисперсного кремнезема / Г.Д. Чукин. – М.: Типография Паладин, ООО «Принта», 2008. – 172 с.
8. **Смирнова, А.И.** Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты: учебное пособие / А.И. Смирнова, И.И. Осовская. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 31 с.
9. **Тагер, А.А.** Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. – М.: Научный мир, 2007. – 573 с.
10. **Тарасевич, Б.Н.** ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы / Б.Н. Тарасевич. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 54 с.
11. **Купцов, А.Х.** Фурье-спектры комбинационного рассеяния и инфракрасного поглощения полимеров: справочник / А.Х. Купцов, Г.Н. Жижин. – М.: Физматлит, 2001. – 656 с.

Shapovalov V.M., Timoshenko V.V., Zlotnikov I.I., Tartakovsky Z.L., Pantukhov O.E., Taletsky V.V.

Effect of highly dispersed metasilicates on the properties of polymers

The effect of highly dispersed silicate fillers (industrial metasilicates of metals and silicic acid) on the mechanical properties of polymers (low-pressure polyethylene and phenol-formaldehyde resin) as well as processes occurring in polymers under the heating are studied. It is proved that the introduction of highly dispersed metasilicates in the polymer matrix allows to control the processes occurring in polymer composite materials during the heating and to improve such important parameters as resistance to thermal and thermal-oxidative degradation, as well as heat resistance and mechanical strength.

Keywords: polymers, fillers, metasilicates, polymeric composite materials.

Поступила в редакцию 25.07.2017 г.

УДК 666.3.022.6

ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ

Павленко А.П., Ахраменко Н.А. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь)

Опробовано формование изделий из алюмооксидной керамики различными способами, рассмотрено их влияние на сохранность формы образцов, усадку, структуру и некоторые свойства керамики. Установлено, что метод сухого прессования наиболее подходит для формования деталей больших размеров и простой формы, методы горячего литья под давлением термопластичных шликеров и пластичного формования – малогабаритных деталей сложной формы.

Ключевые слова: алюмооксидная керамика, формование, прессование, литье, структура.

Введение

Изделия из технической керамики находят все большее распространение в различных областях науки и техники. Наиболее успешно они конкурируют с изделиями из других материалов в условиях, где первостепенное значение имеют такие свойства материалов, как твердость, механическая прочность, термостойкость, износостойкость, в частности, в триботехнике. Это различного вида подшипники скольжения, опорные подшипники, кольца в торцовых уплотнениях компрессоров и жидкостных насосов, уплотнительные втулки в жидкостных насосах, различного вида уплотнительные устройства в кранах, шибах и т.д. Одно из направлений успешного использования керамических материалов в узлах трения – в различного рода нитеводителях – определено их высокой износостойкостью. Они широко используются в производстве волокон (натуральных, синтетических, углеродных, минеральных), проволоки из различных металлов, в ткацком производстве.

Интересным направлением успешного использования керамики является футеровка керамическими вставками различных валов и барабанов. Транспортировка продуктов горнодобывающей отрасли часто осуществляется различного рода транспортерами. Длина транспортерной ленты измеряется в десятках километров. Для протягивания транспортерной ленты используются ведущие металлические барабаны диаметром более нескольких метров, обеспечение достаточного сцепления достигается их футеровкой износостойкой резиной. С целью повышения сцепления и износостойкости, барабаны дополнительно футеруются керамическими накладками.

Методы формования керамики

Обычно детали узлов трения изготавливают по традиционной технологии, включающей этапы приготовления пресспорошков или формовочных масс, формования изделий, обжига и послеобжиговой обработки [1]. Выбор технологических приемов обуславливается размерами, формой и назначением изделий.

Свойства спеченных керамических материалов, сохранение их формы и состояние поверхности в значительной мере определяется выбором метода формования. От него зависит и состав формовочной массы, и содержание в ней технологической связки, и, следовательно, величина усадки при спекании, пористость, плотность спеченного материала.

В настоящее время в производстве изделий из технической керамики наиболее широко используются следующие методы формования [2]:

- горячее литье под давлением из термопластичных шликеров;
- пластическое прессование в металлические высокоточные пресс-формы;
- сухое прессование на прессах в металлические высокоточные пресс-формы;
- изостатическое прессование (газовое, жидкостное);
- мундштучное прессование на экструзионных машинах;
- горячее прессование в термостойкие формы;
- взрывное (детонационное) формование;
- формование электромагнитным импульсом.

В производстве высокоточных малогабаритных изделий обычно используют горячее литье под давлением термопластичных шликеров, пластическое прессование формовочных масс и сухое (или полусухое) прессование порошков. Каждый метод обладает присущими ему достоинствами, имеет свои недостатки. Выбор метода обусловлен рядом факторов, основными из которых являются:

- размеры изделия, требования к точности соблюдения размеров;
- сложность формы изделия и требования к ее сохранности;
- чистота поверхности;
- предназначение изделия и его стоимость, массовость;
- технологичность;
- стоимость, сложность и дефицитность оборудования;
- экологичность и безвредность производства.

Рассмотрим вышеуказанные методы формования подробнее.

Метод горячего литья под давлением. Метод заключается в заполнении под давлением высокоточных литейных форм, в основном металлических, шликерами – литейными системами, обладающими достаточной текучестью. Для формования малогабаритных изделий наиболее часто применяют термопластичные шликеры, использование которых позволяет минимизировать содержание связки в шликере, значительно интенсифицировать технологический процесс, допустить многократное использование сырья. Заполнение технологических форм происходит при температуре 60-120 °С (в зависимости от состава технологической связки) и давлении 1-10 кг/см² (0,1-1 МПа). Шликеры готовят путем тщательного перемешивания в различного типа мешалках сухих керамических порошков с термопластичной связкой. Для интенсификации процесса перемешивания, получения шликеров с хорошими реологическими свойствами, используются аппараты интенсивного перемешивания типа ГАРТ и ПАРТ [3].

Составы технологических связок очень разнообразны, чаще всего в качестве основы используют парафин, благодаря его хорошим технологическим свойствам, низкой температуре плавления, хорошей текучести при сравнительно небольших температурах (60-100 °С), нетоксичности. Для улучшения смачивания связкой частиц порошка керамики и литейных свойств шликеров в состав связки вводят ПАВ. Содержание связки в шликерах обычно 13-20 мас. % в зависимости от ее состава и требуемых литейных свойств. При формовании этим методом используется простое технологическое оборудование.

Существует несколько типов литейных машин для формования керамики – с верхней заливкой шликером – например, вертикальные литейные машины ПЛ-71, ВЛМ-93 производства республиканского унитарного предприятия «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Металлополимер» г. Гомель, и с нижней заливкой –

например, установка литья керамики У141. С целью снижения количества пузырей и раковин установки могут оснащаться устройствами вакуумирования шликеров.

Основными достоинствами метода являются его высокая технологичность, простота, возможность формования изделий сложной формы, высокая чистота поверхности заготовок; достаточно однородное распределение плотности по объему. К недостаткам метода следует отнести высокое содержание технологической связки и, следовательно, значительную усадку изделий на спекании, трудности при формовании изделий больших размеров, наличие остаточных пузырей и раковин.

Метод пластичного формования. Заключается в запрессовке под давлением в высокоточные прессформы (обычно металлические) формовочной керамической массы. Давление прессования $80-120 \text{ кг/см}^2$ (8-12 МПа), температура прессования $20-150^\circ\text{C}$. Приготовление формовочной массы более трудоемко, чем приготовление шликеров – после смешивания порошков с технологической связкой требуется измельчение полученной массы до гранул 1-5 мм. В качестве связки используются водные растворы ПВС, парафины, нафталин, глинистые связующие. Содержание связки в массе от 5 до 25 мас. % в зависимости от ее состава и размеров изделия. Метод относительно прост, технологичен, позволяет получать изделия сложной формы, достаточно однородное распределение плотности по объему, используется относительно простое технологическое оборудование. В связи с большим содержанием связки спекание изделий сопровождается значительными усадочными явлениями, возможными нарушениями форм и размеров.

Метод сухого прессования. Заключается в запрессовке под большим давлением в высокоточные прессформы (обычно металлические) керамических пресспорошков. Давление прессования от 100 до 400 МПа, температура от 120 до 200°C . Приготовление пресспорошков – наиболее трудоемкая часть процесса, требующая диспергации керамической массы до частиц размером 0,2-0,8 мм. В качестве связки обычно используются водные или другие растворы некоторых полимеров, в основном ПВС, полистирола, полиметилметакрилата. Содержание связки в порошках от 2 до 10 мас. %. Основными достоинствами метода являются малая усадка изделий на спекании, возможность сохранения формы изделий больших размеров. Метод технологически более трудоемкий и требует достаточно сложного технологического оборудования и оснастки, не позволяет формировать изделия сложной формы. Значительным недостатком метода является неравномерное распределения плотности заготовки по объему. Применяется для формования изделий относительно простых форм.

Вышеперечисленные методы наиболее подходят для массового производства, изостатическое прессование, горячее прессование в термостойкие формы, взрывное (детонационное) формование и формование электромагнитным импульсом – предпочтительно для изготовления единичных изделий с уникальными характеристиками.

Опробование формования алюмооксидной керамики различными методами

С целью получения изделий с максимально плотной структурой и лучшими механическими свойствами проведено сравнение методов формования изделий различной сложности форм из корундовой керамики марки ВК94-1, и дана оценка влияния способа формования на некоторые свойства и износоустойчивость спеченного керамического материала. Были отформованы прямоугольные штабики размером $7 \times 7 \times 67 \text{ мм}$, футеровочные накладки и опорные изоляторы нагревателя (рисунок 1).

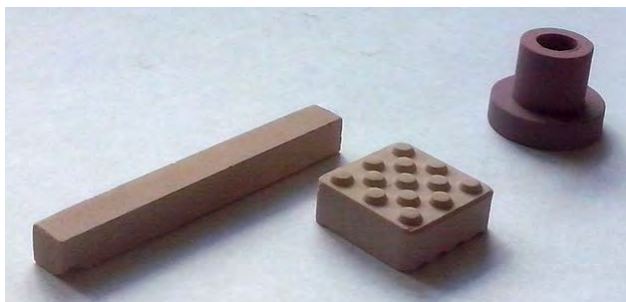


Рисунок 1. – Штабики, футеровочные накладки и опорные изоляторы нагревателя, отформованные из керамики

нилового спирта (ПВС). Сухой ПВС предварительно растворяли в воде при температуре 65-70 °С в течение 4 часов из расчета получения десятипроцентного раствора. Керамический порошок перемешивали с водным раствором ПВС в количестве из расчета получения 3 % сухого остатка ПВС. Полученную пластичную массу перетирали последовательно через сита № 2 и № 1. Пресспорошки для полусухого прессования подсушивали на воздухе до остаточной влажности примерно 3 %, для сухого прессования – до остаточной влажности 1 %.

Полусухое прессование проводили на ручном гидравлическом прессе фирмы «CARZEISS JENA» (Германия) усилием 10 т в одноместные металлические прессформы при комнатной температуре. При формировании штабиков использовалась одноосная и односторонняя схема прессования, поскольку площадь образца значительно превышает его толщину. При формировании накладок и изоляторов использовали одноосную, двухстороннюю схему прессования. Порошок в прессформе предварительно разравнивали и уплотняли на вибростоле. Давление прессования изменяли от 15 до 100 МПа. После снятия нагружения отформованный образец выталкивался из прессформы пуансоном.

Формование образцов методом сухого прессования проводили на гидравлическом прессе усилием 60 тонн в одноместные металлические прессформы. Схема прессования – одноосная, двухсторонняя. Прессование проводили при давлении от 100 до 400 МПа при температуре 180 °С.

Формование образцов методом горячего литья под давлением термопластичных шликеров проводилось на машине литья керамики модели У141 с нижней заливкой шликером и на литьевой машине ВЛМ-93 с верхней заливкой при температуре 70-85 °С и давлении 0,1-0,6 МПа в металлические формы с высокой чистотой рабочих поверхностей. Шликеры приготавливались из предварительно высушенных порошков керамики ВК-94-1 с добавлением 13-16 мас. % органической связки, состоящей из 90 мас. % парафина и 10 мас. % воска пчелиного. Именно такое содержание технологической связки обеспечивает наилучшие литейные свойства шликеров [4]. Выемка образцов из прессформы осуществлялась при ее остывании и разьеме.

Отформованные вышеуказанными способами образцы спекали в 2 стадии. Выжигание технологической связки проводили в электрической лабораторной печи КО-14 (Германия) в никелевых лодочках в засыпке глиноземом марки ГОО. Подъем температуры до 1100 °С проводился со скоростью 5 град/мин. Остывание – произвольное. Окончательное спекание проводили в вакуумной электрической печи СШВ-1.2,5/25И2 в корундовых лодочках в засыпке алундом марки КО в условиях глубокого вакуума. Скорость подъема температуры в печи – 10 град/мин, максимальная температура 1550 °С, время выдержки при максимальной температуре – 3 часа, остывание – с печью.

Формование изделий методом пластичного прессования проводили из формовочной массы из порошков с термопластичной связкой на основе нафталина. Содержание связки в массе примерно 10 %. Давление прессования изменяли от 7,5 до 10,0 МПа, температуру – от 75 до 150 °С.

Формование изделий методом полусухого и сухого прессования проводили из пресспорошков, содержащих в качестве технологической связки водный раствор поливи-

Результаты исследований

Форма. Оценивали сохранность формы, состояние поверхности, наличие сколов, раковин, свилей, внутренних пустот, однородность структуры.

Конфигурация и размеры отформованных изделий полностью сохранялась при всех (вышеуказанных) методах формования. Некоторые технологические затруднения возникали при использовании горячего литья под давлением термопластичных шликеров, особенно при нижней заливке шликером. Особо тщательно следует подбирать температуру шликера – она должна быть минимальной, при которой шликеры еще обладают текучестью. При отливке достаточно объемных изделий шликерами с высокой степенью текучести возможно «захлопывание» шликера, образование пустот и раковин. То же касается и температуры питателя – она должна быть минимально возможной. Имеет значение и температура прессформ: в слишком холодных (15-30 °С) происходит слишком быстрое затвердевание шликера, возможны «недоливы», нарушения формы. Большое значение при отливке имеет и давление – с одной стороны, для полного заполнения прессформы оно должно быть достаточно большим, с другой стороны, при большом давлении формования и, как следствие, высокой скорости заполнения прессформы, опять возможно «захлопывание» шликера, образование пустот и раковин. Предпочтительным является постепенное регулируемое изменение давления от 0,1 до 0,6 МПа, но это требует более сложной системы управления давлением. Более простым и, следовательно, предпочтительным является горячее литье термопластичных шликеров верхней заливкой шликера – подбор температуры и давления более простой, их рабочий интервал более широкий.

При пластичном формовании так же следует уделить особое внимание подбору температуры и давления формования, хотя их диапазоны гораздо шире, подбор проще.

При использовании метода сухого прессования нарушение формы не наблюдалось в достаточно широком диапазоне температур и давлений. Особое внимание следует уделять однородности пресспорошков, остаточной влажности, равномерности распределения засыпки в прессформе и возможности «перепрессовки» расслоения заготовок вследствие чрезмерно высокого давления прессования.

Иная картина наблюдалась после спекания изделий до максимальной плотности. На деталях, полученных методами горячего литья и пластичного формования, значимых нарушений формы при подобранных режимах термообработки не обнаружено. А на деталях, полученных методом сухого прессования, особенно более тонкостенных, наблюдалось их коробление, нарушения формы, что указывает на значительные остаточные напряжения в образовавшейся структуре. Это требует очень тщательного подбора режимов прессования, а в некоторых случаях указывает на невозможность получения деталей подобной формы и размеров. Этот метод целесообразно применять для формования габаритных изделий простых форм.

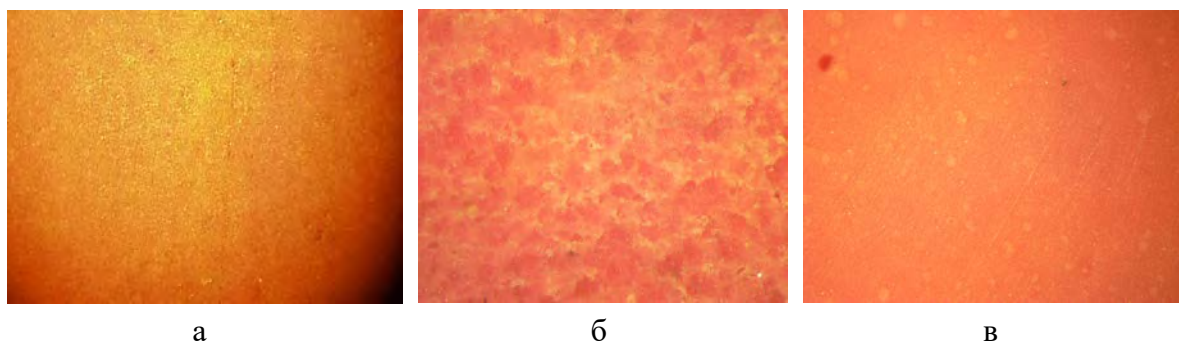
Поверхность и структура. Визуально (под микроскопом при увеличении в 32 раза) оценивалась поверхность отформованных материалов на наличие свилей, трещин, пузырей, раковин.

Наиболее ровная поверхность у образцов, полученных методом пластичного формования и горячего литья (рисунок 2). При тщательном подборе режимов формования, а именно: температуры шликера, питателя и прессформы, при хорошей полированной поверхности прессформ, можно получить изделия без видимых свилей, раковин, трещин, с минимальным количеством скрытых пузырей. На образцах, полученных методом сухого прессования, четко видны границы частиц пресспорошка, причем глубина и протяженность этих границ усиливается с уменьшением остаточной влажности формовочного материала.



а – пластичное прессование; б – сухое прессование; в – литье под давлением
Рисунок 2. – Структура поверхности отформованного материала ВК94-1, полученного различными методами

Проведена визуальная оценка структуры спеченных образцов (шлифов), полученных формованием из керамического материала ВК94-1 различными методами формования (рисунок 3). Наиболее плотная однородная структура у образцов, полученных методом пластичного формования (рисунок 3а). У образцов, полученных методом горячего литья (рисунок 3в), наблюдается значительная остаточная пористость (более светлые пятна на фото), что вызвано большим содержанием технологической связки в шликерах. Наиболее неоднородная структура у образцов, полученных сухим прессованием (рисунок 3б) – видны следы бывших границ между частицами пресспорошка.

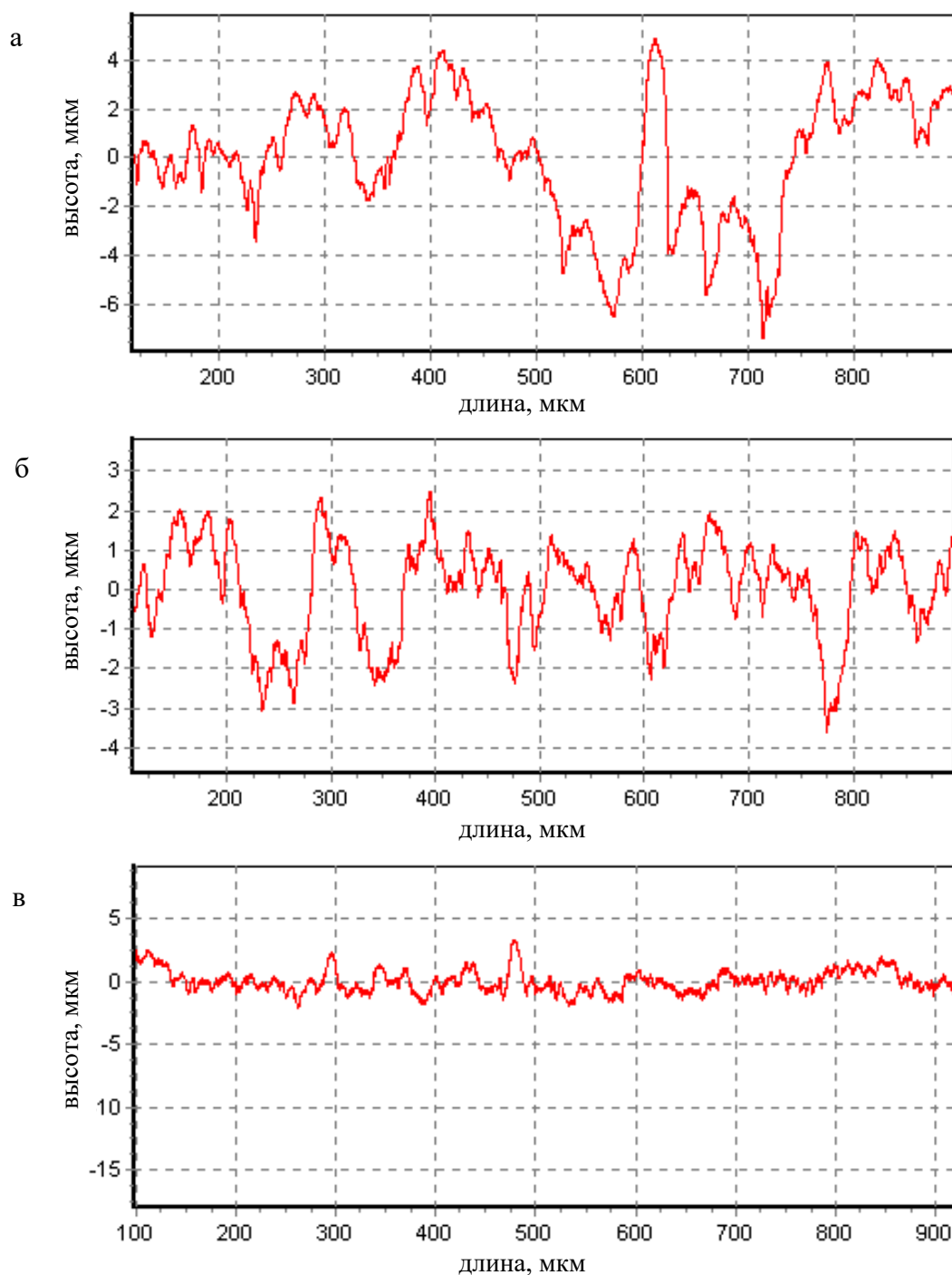


а – пластичное прессование; б – сухое прессование; в – литье под давлением
Рисунок 3. – Структура спеченного материала ВК94-1, формованного различными методами

Результаты визуального контроля подтверждены анализом шероховатости поверхности спеченных материалов (рисунок 4) – наименьшая шероховатость поверхности у образцов, полученных методом пластичного формования (рисунок 4в).

Таким образом, с точки зрения формирования однородной структуры и поверхности высокой чистоты предположительно метод пластичного прессования и горячего литья под давлением термопластичных шликеров.

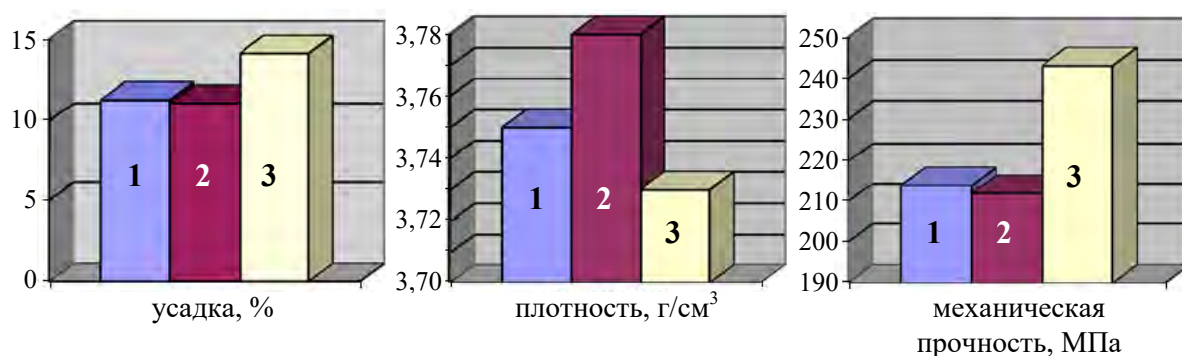
Результаты изучения некоторых свойств спеченных образцов представлены в таблице. Измерения параметров проводили по стандартным методикам [5].



а – сухое прессование: $R_a = 2,09422$, $R_z = 2,607$, $l = 841,917$ (обозначения по ГОСТ 2789-73 [6]); б – горячее литье: $R_a = 0,98812$, $R_z = 1,218$, $l = 831,650$; в – пластичное формование: $R_a = 0,66706$, $R_z = 0,867$, $l = 1009,604$

Рисунок 4. – Профилограммы поверхностей керамических образцов ВК94-1

Ожидаемо, наибольшая усадка (рисунок 5) у образцов, полученных методом горячего литья, поскольку используемые при этом шликеры содержат наибольшее количество технологической связки (13-15 мас. %). Содержание связки оказывает большое влияние и на плотность спеченных материалов – она наименьшая у отлитых образцов, что вызвано значительной остаточной микропористостью, образующейся в результате выгорания органической связки.



1 – пластичное формование; 2 – сухое прессование; 3 – литье под давлением
 Рисунок 5. – Усадка, плотность и механическая прочность керамических материалов, формованных различными способами

При прессовании на усадку и плотность материалов оказывает влияние и давление прессования – с его повышением растет плотность и снижается усадка, что объяснимо повышением плотности упаковки зерен пресспорошков в отформованных изделиях (таблица).

Таблица. – Некоторые свойства спеченного керамического материала ВК94-1

Режим прессования			Плотность $\rho \cdot 10^3$, кг/м³	Усадка, %	Прочность на изгиб σ , МПа	Износ, изменение длины $\Delta L \cdot 10^3$, мм
Метод прессования	Температура T , °C	Давление p , МПа				
пластичное	20	15	3,82	11,7	211	-
		25	3,82	11,4	228	-
		50	3,84	11,2	241	135
		100	3,84	10,9	214	125
сухое	180	100	3,82	12,0	199	-
		200	3,86	11,8	238	132
		300	3,85	11,9	215	136
		400	3,86	11,8	212	131
литье	75	0,5	3,73	13,9	243	135

Несколько неожиданный результат получился при изучении механической прочности на изгиб спеченных материалов, отформованных различными способами – она наибольшая у образцов, полученных горячим литьем под давлением, несмотря на наименьшую плотность и наибольшую остаточную пористость. Можно предположить, что это вызвано более равномерным распределением зерен керамики, отсутствием границ между частицами пресспорошка, которые являются концентраторами различных дефектов структуры, ослабляющих материал, а также снижением возникающих внутренних напряжений на микропустотах.

Значимого влияния условий формования на износостойкость [7] спеченных материалов не обнаружено – наиболее износостойкие материалы получают методом пластичного формования, хотя и сухим прессованием и горячим литьем под давлением возможно формование изделий достаточно высокой износостойкости.

Выводы

Рассмотренные методы – сухое прессование, пластичное прессование и горячее литье под давлением термопластичных шликеров – могут использоваться для формования изделий из высокоглиноземной керамики. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Метод сухого прессования позволяет формировать детали значительных размеров без нарушения формы, без пустот и раковин, однако спеченная керамика имеет пониженную механическую прочность, вследствие имеющейся неоднородности структуры.

Метод горячего литья под давлением термопластичных шликеров технологичен, позволяет получать керамику максимальной прочности, однако пригоден для формования в основном малогабаритных деталей, вследствие склонности к образованию внутренних полостей и раковин, а так же повышенной усадки. Метод пластичного формования более подходит для формования «среднегабаритных» изделий, он менее технологичен и требует арматуры высокого давления.

Список использованных источников

1. Балкевич, В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балкевич. – М.: Изд. по строительству, 1968. – 200 с.
2. Остроушко, А.А. Физико-химические основы получения твердых материалов электронной техники. Курс лекций / А.А. Остроушко, Ю.В. Могильников. – Екатеринбург, 1998.
3. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика / М.А. Промтов. – М.: «Машиностроение», 2001. – 247 с.
4. Павленко, А.П. Подбор состава технологической связки термопластичных шликеров из порошков неорганических материалов / А.П. Павленко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 4. – С. 62-67.
5. Бакунов, В.С. Практикум по технологии керамики и огнеупоров / В.С. Бакунов. – М.: Стройиздат, 1972. – 351 с.
6. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения: ГОСТ 2789-73. – Введ. 01.01.75. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1975. – 6 с.
7. Дынкович, В.Н. Методика ускоренной оценки износостойкости керамических материалов / В.Н. Дынкович, А.П. Павленко // Трение и износ. – 2006. – № 2. – С. 221-224.

Pavlenko A.P., Akhramenko N.A.

Molding of alumina ceramics products

The molding of alumina ceramics products was exercised in a number of ways. We studied the effect of various methods on the shape retention of the samples, on the shrinkage, the structure and some properties of ceramics. It was established that the method of dry pressing is the most suitable for the molding of large-scale and simple-shaped items, the methods of thermoplastic slurry and plastic molding pressure hot-casting is the most suitable for the molding of small-scale complex items.

Keywords: *alumina ceramic, molding, pressing, casting, structure.*

Поступила в редакцию 30.06.2017 г.

УДК 021.893-025.678.19

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА МНОГОУРОВНЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Авдейчик С.В., Антонов А.С., Струк В.А., Воронцов А.С. (УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь)

Рассмотрены направления реализации принципа многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии полимерных композиционных материалов на основе термопластов. Показано, что введение в состав композита наноразмерных частиц различного строения и технологии получения позволяет трансформировать структуру на различных уровнях организации, что приводит к достижению синергического эффекта повышения параметров деформационно-прочностных, триботехнических характеристик и устойчивости к воздействию термоокислительных сред. Перспективной технологией введения наномодификаторов в состав композита является диффузионная обработка компонентов и изделий в растворах прекурсора. Разработаны составы композитов с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик для применения в машиностроении, химической и горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: структурный уровень, наночастицы, синергический эффект, диффузионное модифицирование.

Введение

Функциональное материаловедение полимерных материалов обеспечивает развитие различных отраслей жизнедеятельности социумов: машиностроения, нефтехимической промышленности, строительной индустрии, медицины и др. Поэтому разработка методологических подходов к созданию композиционных материалов нового поколения, в том числе нанокompозитов, относится к числу приоритетных направлений развития фундаментальных и прикладных исследований Республики Беларусь, определяющих инновационное функционирование и развитие хозяйственного комплекса [1, 2].

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии полимерных функциональных композитов [1, 3-7], позволяет утверждать о превалировании структурного фактора в реализации заданных параметров деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и др. характеристик изделий при различной интенсивности воздействия эксплуатационных факторов. Сложившаяся методология создания полимерных материалов для изготовления компонентов статических (адгезионных) и динамических (триботехнических) металлополимерных систем различного функционального назначения и условий эксплуатации базируется преимущественно на методах управления структурной организацией, учитывающих влияние одного или нескольких превалирующих факторов – теплофизических, деформационных, коррозионных, деструкционных и др. [1, 3-12]. Практическая реализация такой методологии основана на управлении структурными параметрами композитов на одном из уровней их организации – молекулярном, межмолекулярном, надмолекулярном и межфазном, путем введения функциональных компонентов в состав материала или использования специальных методов модифицирования изделий (рисунок 1). Системный подход к определению потенциальных возможностей композиционного материала к адекватному противодействию эксплуатационных факторов, вызывающих разрушение или изнашивание компонентов металлополимерной системы, свидетельствует о необходимости учета совокупного действия различных физико-химических, теплофизических, деформационных, коррозионных, электрофизических и др. процессов, определяющих механизмы и кинетику структурных превращений на различных организационных уровнях.

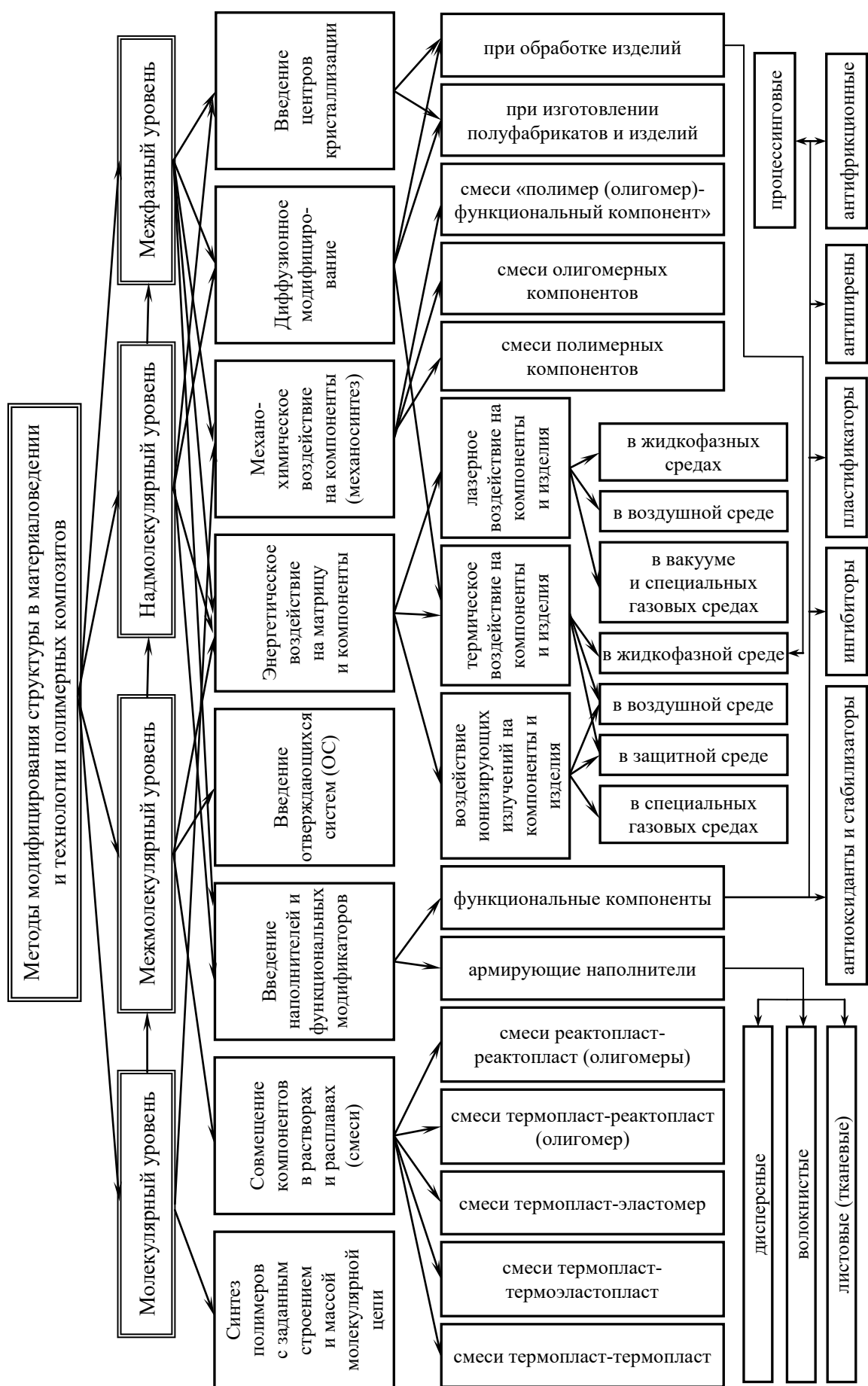


Рисунок 1. – Основные направления структурного модифицирования в материаловедении и технологии полимерных композиционных материалов

Перспективность системного подхода доказана в ряде исследований, посвященных созданию малоизнашивающихся металлополимерных систем путем введения компонентов, формирующих под действием эксплуатационных факторов структуры с функцией ингибиторов неблагоприятных процессов [13].

Другим плодотворным направлением системного подхода является разработка так называемых «интеллектуальных материалов», параметры характеристик которых трансформируются в соответствии с изменениями параметров эксплуатационных факторов [1].

Очевидно, что композиционные материалы нового поколения должны с высокой степенью адекватности трансформировать первоначальную структуру при воздействии переменных эксплуатационных факторов с изменяющейся интенсивностью для оптимального противостояния и сохранения заданных параметров безопасной, эффективной и комфортной эксплуатации металлополимерной системы определенного конструктивного исполнения и функционального назначения. В этом аспекте особую перспективу представляет разработка технологических методов практической реализации принципа многоуровневого модифицирования, предложенного в [14].

Основная часть

Объекты и методика исследований. Для проведения исследований использовали полимерные материалы, относящиеся к классу алифатических полиамидов: ПА 6-210/310 низковязкий, ПА 6.6-Л (филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»), ПА 66/6 Grilon TSS/4, ПА 12 Grilamid L20 (EMS-CHEMIE AG, Швейцария), ПА11 Rilsan (Arkema, Франция). Отдельные эксперименты проводили с полиолефинами – полипропиленом (ПП), полиэтиленом низкого (ПЭНД) и высокого давления (ПЭВД).

Для управления параметрами структуры и эксплуатационных характеристик изделий из композитов использовали дисперсные, в том числе наноразмерные, частицы углеродсодержащих (коллоидно-графитовый препарат С-1, шихта детонационного синтеза баллистических порохов, углеродные нанотрубки (НП ЗАО «Синта», ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»)), кремнийсодержащих (глины, трепел (ОАО «Стальное»)) и металлсодержащих (формиат меди) соединений, полученных по оригинальным технологиям производителей.

Совмещение компонентов осуществляли по технологиям экструзионного смешивания на двухшнековом экструдере МРС 67/2 фирмы Comrex, термомеханического смешивания в материальном цилиндре литьевой машины Battenfeld серии ТМ (Wittmann Battenfeld GmbH, Германия) при режимах, регламентированных производителями оборудования.

Диффузионное модифицирование гранулированных или порошкообразных полуфабрикатов полимерных композитов осуществляли путем экспозиции в растворе прекурсора (формиата меди) в течение 1-10 ч с последующей сушкой для удаления растворителя.

Физико-химические процессы на различных уровнях структурной организации композиционных материалов исследовали с применением современных методов анализа: ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон-3,0), дифференциально-термического анализа (Thermoscan-3), атомно-силовой (АСМ), электронной растровой (РЭМ) и оптической (ОМ) микроскопии с использованием установок Mira, Tescan, NT-206, MDS.

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических и адгезионных характеристик композиционных материалов и покрытий оценивали по общепринятым

методикам с использованием стандартных и оригинальных образцов по действующей нормативной документации на специализированном оборудовании Z010 Zwick, FT-2. Обработку результатов осуществляли с помощью программных продуктов, входящих в комплект оборудования.

Результаты и обсуждения

В различных металлополимерных конструкциях изделия из композиционных материалов подвергаются длительному воздействию повышенных температур, которые интенсифицируют процессы термоокислительной деструкции, приводящие к снижению параметров деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных и других характеристик [1, 3-8, 13, 14]. Повышение стойкости изделий из полимерных и композиционных материалов к старению под действием эксплуатационных факторов относится к числу актуальных проблем функционального материаловедения [13, 15-17]. Традиционные подходы к решению этой проблемы, основанные на введении функциональных компонентов (антиоксидантов, стабилизаторов, ингибиторов процесса деструкции и т.п. [18-20]), регулирующих кинетику термоокислительных и термодеструкционных процессов, в ряде случаев сопряжены с необходимостью использования дорогостоящих модификаторов, применение которых увеличивает стоимостные параметры изделий, снижая их конкурентоспособность. Кроме того, ресурс действия антиоксидантов цепного механизма действия [21] ограничен их содержанием в материале, и после их исчерпания наблюдается резкое снижение параметров эксплуатационных характеристик изделий, которое может привести к его разрушению и выходу из строя металлополимерной системы.

Эффективным направлением повышения стойкости изделий из полимерных и композиционных материалов к термоокислительному старению является реализация механизма нецепной стабилизации, предложенного в работах Г.П. Гладышева и сотрудников [20], сущность которого состоит во введении в состав компонентов, способных к преимущественному взаимодействию с активным кислородом с образованием оксидных соединений. При этом тормозятся цепные процессы термоокисления и деструкции матричного связующего, что благоприятно сказывается на стойкости изделий. В качестве таких «нецепных» стабилизаторов эффективны высокодисперсные частицы металлов, обладающие большим сродством к кислороду. Подходы, предложенные в [20], основаны на механизмах предотвращения или уменьшения вероятности взаимодействия атомов кислорода (озона) с активными центрами макромолекул связующего и реализуются при наличии в композите достаточных количеств модификаторов с повышенным сродством к кислороду. После исчерпания активного модификатора интенсивность процессов термоокислительной деструкции и старения увеличивается, что приводит к уменьшению продолжительности эксплуатационного ресурса изделий.

Эффективным направлением реализации механизма нецепной стабилизации в полимерных композитах на основе термопластов является введение наноразмерных частиц металлов путем термолиза металлсодержащих прекурсоров непосредственно в расплаве матричного связующего в процессе переработки композита в изделие методом литья под давлением или экструзии [13, 14, 22]. Этот подход, основанный на классических представлениях влияния надмолекулярной структуры на кинетику термоокислительных и термодеструкционных процессов в термопластах, разработанных проф. А.Н. Мачюлисом [21], был развит в исследованиях проф. В.А. Струка, проф. А.А. Рыскулова и сотрудников [13, 22, 23]. Был установлен особый механизм нецепной стабилизации термопластичных полимеров класса полиамидов, полиацеталей, полио-

лефинов и их термомеханически совмещенных смесей, содержащих наноразмерные частицы металлов, состоящий в сочетании структурных факторов и фазовых превращений в металлополимерных композитах с допинговым содержанием (0,01-0,5 мас. %) модификатора. Важным следствием проведенных комплексных исследований является установленный факт изменения энергетических параметров макромолекулы матричного полимера в результате взаимодействия их активных центров с наноразмерными частицами модификаторов (частицами металлов и оксидов), образующимися при термолизе металлосодержащего прекурсора.

Нами было сделано предположение о возможности реализации механизма нецепной стабилизации, свойственного для металлополимеров [23], в композитах, содержащих другие, в том числе неметаллические модификаторы с наноразмерным диапазоном частиц.

Для исследований были выбраны алифатические полиамиды и наноразмерные углеродсодержащие частицы – углеродные нанотрубки (УНТ), шихта детонационного синтеза баллистических порохов (шихта), коллоидно-графитовый препарат С-1 (КГП С-1) в состоянии промышленной поставки.

Для оценки эффективности действия наноразмерных углеродсодержащих частиц использовали модельные композиты на основе алифатических полиамидов ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12, содержащие наноразмерные частицы меди при содержании 0,075-0,6 мас. %. Наноразмерный металлосодержащий модификатор получали термообработкой гранулированных или порошкообразных полуфабрикатов, диффузионно модифицированных в водных растворах металлосодержащего прекурсора (формат меди) в течение 1-10 ч.

Модельные эксперименты осуществляли с композитами на основе полиолефинов, содержащих различные модификации углеродсодержащих продуктов детонационного синтеза (УДА, УДАГ) в количестве 0,1-1,0 мас. %.

Сравнительную оценку эффективности действия наноразмерных модификаторов различного состава в полиамидных исходных, смесевых и композиционных матрицах осуществляли по параметрам деформационно-прочностных характеристик стандартных образцов, подвергнутых термоокислительному старению при температуре 423 ± 5 К (150 ± 5 °С) в среде воздуха в течение до 200 часов. В качестве критерия был выбран параметр прочности при максимальном усилии σ_M , МПа. Экспериментальные данные приведены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3.

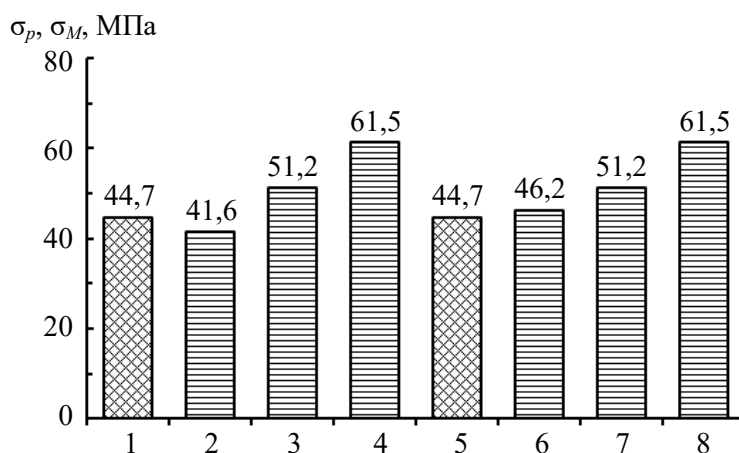
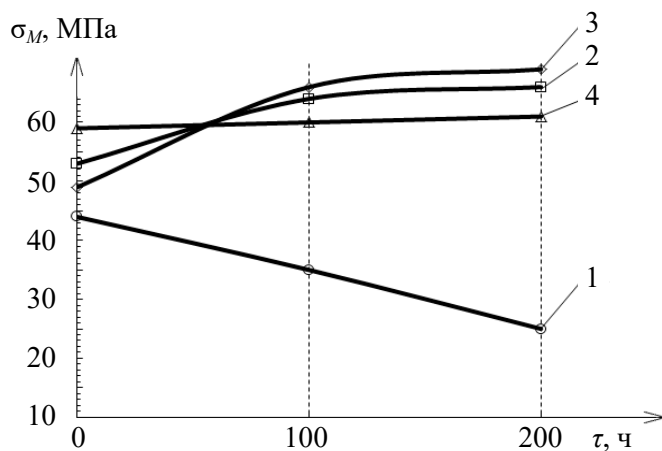


Рисунок 2. – Зависимость прочности при разрушении σ_p (1-4) и прочности при максимальном усилии σ_M (5-8) образцов из ПА 6-210/310 исходного (1, 5) и модифицированного в 10 %-м водном растворе формиата меди в течение 1 ч (2, 6), 5 ч (3, 7) и 10 ч (4, 8)

Таблица 1. – Параметры деформационно-прочностных характеристик образцов из полиамида ПА 6-210/310

Характеристика материала	Состав материала	Параметры характеристик материала		
		в исходном состоянии	после 100 ч экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	после 200 ч экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Физический предел текучести (прочности), МПа	ПА 6	40,665	–	–
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	46,2	64,375	–
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	49,3	63,65	–
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	48,775	61,95	63,8
Деформация при физическом пределе текучести (прочности), %	ПА 6	10,32	–	–
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	25,743	17,498	–
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	28,423	16,543	–
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	23,131	17,190	12,436
Прочность при максимальном усилии, МПа	ПА 6	44,674	34,848	26,663
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	46,2	64,375	67,225
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	51,2	63,65	65,9
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	61,525	61,95	63,8
Деформация при максимальном усилии, %	ПА 6	231,413	3,503	4,623
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	25,743	17,498	15,041
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	335,137	16,543	12,650
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	380,006	17,190	12,436
Прочность при разрушении, МПа	ПА 6	44,674	34,848	26,663
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	41,6	60,7	67,225
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	51,2	46,675	65,9
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	61,525	46,45	61,875
Деформация при разрушении, %	ПА 6	231,413	3,503	4,623
	ПА 6 + ф.м. (1 ч)	231,714	23,174	15,041
	ПА 6 + ф.м. (5 ч)	335,137	50,354	12,650
	ПА 6 + ф.м. (10 ч)	380,006	42,051	13,761

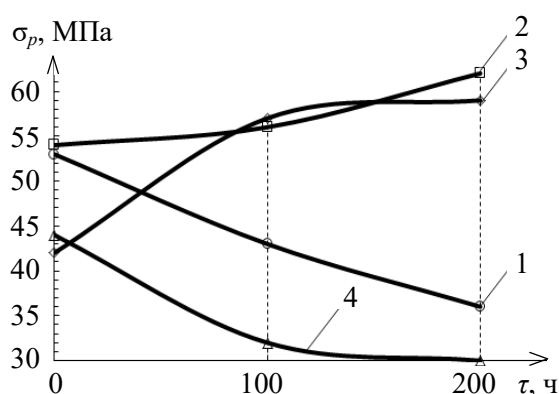
Рисунок 3. – Зависимость прочности при максимальном усилии σ_m в зависимости от времени термообработки при 423 К (150 °С) ПА 6 (1), ПА 6 + ф.м. 1 ч (3), ПА 6 + ф.м. 5 ч (2), ПА 6 + ф.м. 10 ч (4)

Как следует из данных, представленных на рисунке 3, диффузионная обработка гранулированного полиамида 6 (ПА 6) водным раствором формиата меди $[\text{Cu}(\text{HCOO})_2]$ в течение 1-10 ч приводит к существенному изменению стойкости стандартных образцов к термоокислительному старению. Параметр исходной прочности образцов из ПА 6-210/310 снижается от 44,67 МПа до 26,66 МПа после 200 ч термоокисления в среде воздуха (рисунок 3 кривая 1). При этом модифицированные

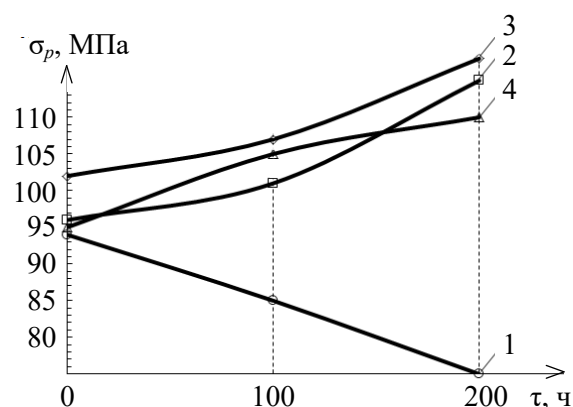
наноразмерными частицами меди образцы не только не снижают исходный параметр σ_M , но и заметно его увеличивают до значений 61,95-67,22 МПа после термоокисления в течение 100-200 ч (рисунок 3 кривые 2, 3, 4).

Полученные результаты подтверждают основные положения механизма действия наноразмерных частиц меди, изложенные в [13]. Необходимо только отметить, что диффузионный механизм введения наноразмерных частиц в полимерную матрицу имеет особую перспективу практического применения, так как характеризуется простотой и доступностью технических операций для достижения технически значимого эффекта по сравнению с другими технологиями, например, смешения.

Аналогичный технически значимый эффект повышения стойкости к термоокислительному старению достигнут и для образцов из композиционных материалов на основе полиамида ПА 6, модифицированных антипиренами (ПА 6-ТГ) и сочетанием антипиренов и 20 мас. % стекловолокна (ПА 6-СВ 20-ТГ). Введение в состав композитов наноразмерных частиц меди в количестве 0,085-0,6 мас. % путем диффузионной обработки в водном растворе формиата меди существенно увеличивает не только исходные параметры деформационно-прочностных характеристик, но и их значения после 100 часов и 200 часов термоокисления при температуре 423 ± 5 К (таблицы 2 и 3, рисунки 4 и 5).



1 – ПА 6-ТГ; 2 – ПА 6-ТГ + ф.м. 1 ч;
3 – ПА 6-ТГ + ф.м. 10 ч; 4 – ПА 6-210/310
Рисунок 4. – Влияние наноразмерных частиц меди на стойкость нанокомпозита к термоокислительной деструкции



1 – ПА 6-СВ 20-ТГ; 2 – ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. 1 ч; 3 – ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. 5 ч;
4 – ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. 10 ч
Рисунок 5. – Влияние наноразмерных частиц меди на стойкость стеклонанополненного полиамида к термоокислительной деструкции

Значительное увеличение параметра прочности при максимальном усилии и прочности при разрушении для композитов ПА 6-ТГ, модифицированных наночастицами меди, свидетельствует о реализации механизмов структурного модифицирования на различных уровнях, предложенных в [13, 14].

Для композитов, содержащих функциональный наполнитель – антипирены и стекловолокно (СВ), наблюдается эффект структурирования при введении наночастиц меди, который проявляется в уменьшении деформативности, оцениваемой по критерию относительного удлинения при растяжении.

Необходимо особо отметить эффект повышения стойкости к воздействию повышенных температур (горению) труднотгорючих образцов, модифицированных наноразмерными частицами меди. Очевидно, активные наночастицы меди, располагаясь в

межмолекулярных областях, уменьшают сродство к кислороду за счет образования пространственной сетки физических адсорбционных связей [1, 14]. В результате этого увеличивается устойчивость композита к воздействию высокотемпературных сред. Полученные результаты позволяют разработать составы трудногорючих материалов с повышенными параметрами деформационно-прочностных характеристик и устойчивости к термоокислительному старению.

Таблица 2. – Параметры деформационно-прочностных характеристик образцов из композиционного трудногорючего полиамида (ПА 6-ТГ)

Характеристика материала	Состав материала	Параметры характеристик материала		
		в исходном состоянии	после 100 часов экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	После 200 часов экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Физический предел текучести (прочности), МПа	ПА 6-ТГ	—	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	26,75	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	47,15	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	29,125	—	—
Деформация при физическом пределе текучести (прочности), %	ПА 6-ТГ	—	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	1,439	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	6,976	—	—
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	2,766	—	—
Прочность при максимальном усилии, МПа	ПА 6-ТГ	52,825	43,453	35,4
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	53,725	56,525	61,725
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	47,15	57,75	62,025
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	41,375	56,675	61,475
Деформация при максимальном усилии, %	ПА 6-ТГ	5,016	3,869	3,876
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	5,271	3,846	3,804
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	6,976	3,786	3,951
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	17,570	3,777	4,471
Прочность при разрушении, МПа	ПА 6-ТГ	52,825	43,453	35,4
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	53,725	56,525	61,725
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	42,65	57,75	62,025
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	41,375	56,675	61,475
Деформация при разрушении, %	ПА 6-ТГ	5,016	3,869	3,876
	ПА 6-ТГ + ф.м. (1 ч)	5,271	3,846	3,804
	ПА 6-ТГ + ф.м. (5 ч)	89,789	3,786	3,951
	ПА 6-ТГ + ф.м. (10 ч)	17,570	3,777	4,471

Близким механизмом комплексного воздействия на структуру композитов на основе алифатических полиамидов обладают и углеродсодержащие частицы различного состава, строения и технологии получения – УНТ, шихта, КГП С-1.

Комплексный модифицирующий эффект проявляется как в исходных полиамидах, так и в смесевых композициях, о чем свидетельствуют данные, представленные на рисунке 6.

Таблица 3. – Параметры деформационно-прочностных характеристик образцов из композиционных материалов на основе стеклонанополненного полиамида ПА 6-СВ 20-ТГ

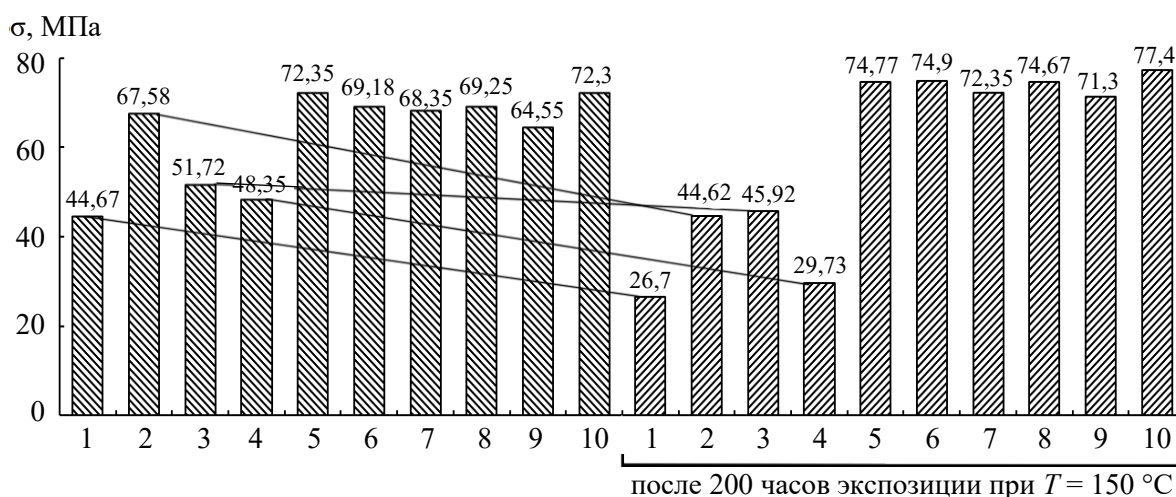
Характеристика материала	Состав материала	Параметры характеристик материала		
		в исходном состоянии	после 100 часов экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	после 200 часов экспозиции при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Физический предел текучести (прочности), МПа	ПА 6-СВ 20-ТГ	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	–	–	–
Деформация при физическом пределе текучести (прочности), %	ПА 6-СВ 20-ТГ	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	–	–	–
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	–	–	–
Прочность при максимальном усилии, МПа	ПА 6-СВ 20-ТГ	94,13	84,72	70,6
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	96,15	103,35	115,38
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	102,43	107,85	117,78
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	94,25	103,72	106,38
Деформация при максимальном усилии, %	ПА 6-СВ 20-ТГ	5,681	4,00	4,686
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	5,841	4,801	4,907
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	6,104	3,859	4,897
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	5,749	4,371	4,937
Прочность при разрушении, МПа	ПА 6-СВ 20-ТГ	96,275	106,78	114,38
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	96,15	103,35	115,38
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	102,43	107,85	117,78
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	94,25	103,72	106,38
Деформация при разрушении, %	ПА 6-СВ 20-ТГ	5,681	4,00	4,686
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (1 ч)	5,841	4,801	4,907
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (5 ч)	6,104	3,859	4,897
	ПА 6-СВ 20-ТГ + ф.м. (10 ч)	5,749	4,371	4,937

Близкое влияние углеродсодержащих наноразмерных частиц различного строения свидетельствует об особенностях механизма их модифицирующего действия, основанного на изменении активности макромолекулы полиамидов к средству с кислородом за счет образования межмолекулярных связей.

Важнейшим фактором увеличения стойкости углеродсодержащих нанокомпозитов на основе совмещенных алифатических полиамидов к термоокислительному старению является структура, сформированная макромолекулами близкого строения, на различных уровнях – межмолекулярном, надмолекулярном, межфазном.

Известно, что алифатические полиамиды являются частично кристаллическими полимерами с преимущественно сферолитным типом надмолекулярной структуры [21]. Как показано в исследованиях проф. В.Г. Савкина и сотр. [17], в реализации повышенных параметров деформационно-прочностных характеристик полиамидов важнейшее значение имеют размеры сферолитов, их структурное совершенство и параметры границы раздела сферолитов. Благодаря близкому строению макромолекул матричного полиамида ПА 6.6 и модификаторов ПА 6, ПА 12, сферолитная структура смесового

композита формируется с участием проходных макромолекул. Благодаря этому происходит образование структуры, подобной сшитой с пространственной сеткой, образованной проходными макромолекулами легирующего полиамида. Такая структура способна противостоять действию внешних нагрузок, прикладываемых к образцу (изделию). Кроме того, наличие в композите легкоплавкого компонента (ПА 12) способствует снижению остаточных напряжений в процессе кристаллизации и охлаждения матричного полимера (ПА 6.6).



1 – ПА 6-201/310; 2 – ПА 6.6-Л; 3 – ПА 66/6; 4 – ПА 12; 5 – ПА 6.6 (94 мас. %) + ПА 6 (5 мас. %) + ПА 12 (1 мас. %); 6 – ПА 6.6 (90 мас. %) + ПА 6 (5 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %); 7 – ПА 6.6 (85 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %); 8 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + КГП С-1 (0,5 мас. %); 9 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + УНТ (0,5 мас. %); 10 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + шихта (0,5 мас. %)

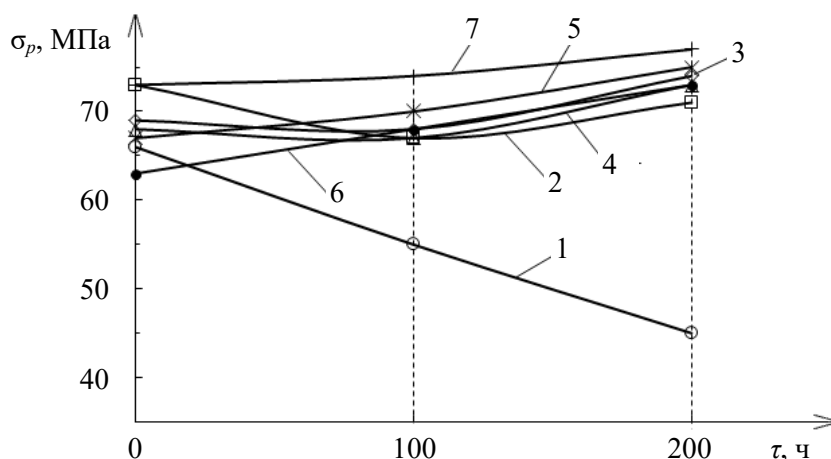
Рисунок 6. – Стойкость смесевых и нанокпозиционных материалов к термоокислительной деструкции

Отмеченные факторы способствуют не только значительному повышению параметров деформационно-прочностных характеристик смесевых композитов, но и стойкости к воздействию термоокислительных сред. При этом значительно уменьшается значение параметра деформирования при максимальном усилии и при растяжении.

Введение в состав композита нанодисперсных углеродсодержащих частиц, которые преимущественно располагаются в межсферолитных областях, эффект увеличения стойкости к термоокислительной деструкции увеличивается благодаря формированию дополнительных физических связей адсорбционного типа (рисунок 7).

Таким образом, наноразмерные углеродсодержащие частицы выполняют функцию физического компатибилизатора, способствуя образованию более совершенной структуры композита на различных уровнях организации.

Подобный эффект структурирующего действия наноразмерных частиц типа природных минералов (глины, цеолитов) и продуктов обработки алмазов установлен в работах проф. А.А. Охлопковой и сотрудников [24] при модифицировании политетрафторэтилена. В структуре фторкомпозитов наночастицы, расположенные преимущественно на поверхности частиц матричного связующего, выполняли функцию активного центра формирования сферолитной структуры из макромолекул близлежащих областей, обеспечивая их своеобразную «сшивку».



1 – ПА 6.6-Л; 2 – ПА 6.6 (94 мас. %) + ПА 6 (5 мас. %) + ПА 12 (1 мас. %);
 3 – ПА 6.6 (90 мас. %) + ПА 6 (5 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %);
 4 – ПА 6.6 (85 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %);
 5 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + КГП С-1 (0,5 мас. %);
 6 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + УНТ (0,5 мас. %);
 7 – ПА 6.6 (84,5 мас. %) + ПА 6 (10 мас. %) + ПА 12 (5 мас. %) + шихта (0,5 мас. %)
 Рисунок 7. – Зависимость параметра прочности при растяжении композиционных материалов на основе полиамидов от времени термоокисления при 423 К (150 °С)

Характерной особенностью углеродных наночастиц является сохранение их структурных параметров в течение длительного воздействия повышенных температур. В отличие от металлических наночастиц, претерпевающих фазовое превращение «металл – металлосодержащие соединения» [23], углеродные частицы сохраняют свою структуру и активность в нанокompозите в течение длительного эксплуатационного воздействия.

Таким образом, модифицирование смесевых композитов на основе алифатических полиамидов наноразмерными частицами различного состава, строения и технологии получения позволяет реализовать синергический эффект повышения параметров деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических характеристик и стойкости к воздействию термоокислительных эксплуатационных сред. Механизм реализации синергического эффекта обусловлен взаимодействием активных центров наноразмерных частиц с центрами полимерных макромолекул с образованием связей адсорбционного типа [14]. Формирование таких связей изменяет интенсивность межмолекулярного взаимодействия в композитах на основе моно- и смесевых матриц, что проявляется в трансформировании структуры композита на межмолекулярном, надмолекулярном и межфазном уровнях. Благодаря многоуровневому структурному модифицированию повышается устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов, в том числе к процессам трибохимического взаимодействия в металлополимерных системах и к повышенным температурам в среде воздуха.

Эффект антиокислительного действия наноразмерных углеродсодержащих частиц различного строения и технологии синтеза преимущественно обусловлен адсорбционным взаимодействием активных центров с образованием физических связей. Эту гипотезу подтверждают факты не только изменения параметров теплофизических характеристик при введении допинговых количеств модификатора (0,01-1,0 мас. %), но и реологических и деформационно-прочностных. При допинговом содержании наноразмерного модификатора количество карбоцепных соединений, которые могут выполнять функцию антиоксиданта полимерной матрицы, как отмечено в [25], незначительно и не может оказать сколь-нибудь существенное влияние на кинетику термоокислительных

процессов в течение продолжительного времени экспозиции в окислительной среде. Поэтому преобладающая роль в проявлении антиокислительного эффекта принадлежит уменьшению макромолекулами средства к кислороду вследствие снижения их активности из-за образования физических пространственных связей. Поэтому этот эффект характерен для различных частиц, имеющих наноразмерный диапазон, которые не относятся к антиоксидантам в общепринятом понимании термина. В пользу этого предположения свидетельствует плавный характер экспериментальных кривых зависимости $\sigma = f(\tau)$ для нанокомпозигов при времени термоокисления до 1000 ч в отличие от аналогичных зависимостей, характерных для композитов, содержащих антиоксиданты, которые характеризуются скачкообразным изменением параметра σ после расходования антиоксиданта [21].

Особую перспективу при реализации принципа многоуровневого модифицирования в композиционных материалах на основе смесей термопластов имеет технология введения наноразмерных частиц методом диффузии растворов различных соединений. Согласно исследованиям проф. Мачюлиса А.Н. и сотрудников [21], глубина проникновения диффундирующего раствора модификатора достигает 100-300 мкм при обработке полимерных полуфабрикатов различной дисперсности и формы – гранул, порошков, фрагментов, полученных дроблением. Толщина модифицированного слоя соизмерима с поперечным размером дисперсных частиц, используемых для получения изделий и покрытий, достигает до 10-30 % размера гранул промышленно выпускаемых полимеров и близка к толщине беструктурного слоя изделий, изготовленных методом литья термопластов под давлением [21]. Диффузионное насыщение приповерхностных слоев полуфабрикатов (частиц, гранул, волокон, пленок) и изделий из композиционных материалов позволяет локализовать наноразмерные частицы с повышенной активностью к адсорбционному взаимодействию в областях, в наибольшей степени определяющих процессы формирования структуры на различных уровнях организации. При совмещении термопластичных полуфабрикатов, подвергнутых диффузионному модифицированию, реализуются наиболее благоприятные условия для межфазных взаимодействий, протекающих на границе раздела областей матричного и модифицирующего компонентов. Наночастицы, локализованные в приповерхностных слоях частиц полуфабрикатов термомеханически совмещенных компонентов, способствуют формированию надмолекулярных структур из совокупности макромолекул матричного и легирующего компонентов. Благодаря этому изменяются параметры термодинамической совместимости, которые способствуют формированию равновесной гетерогенной структуры без выраженных границ раздела между матрицей и легирующей фазой.

При диффузионном модифицировании изделий из композитов, на основе смесевых матриц или армированных фрагментами углеродных, стеклянных и других волокон, реализуется эффект структурного модифицирования наиболее дефектного беструктурного слоя, который в значительной степени определяет параметры эксплуатационных характеристик металлополимерных систем, прежде всего, адгезионных и триботехнических. Достаточно большая толщина диффузионно модифицированного слоя [21] позволяет реализовать градиентную структуру изделия, у которого приповерхностный слой представляет собой нанокомпозиционный материал с высокой степенью структурирования вследствие образования пространственной сетки адсорбционных физических связей, обусловленных локализацией наночастиц в межмолекулярных областях и дефектах структуры. Наноструктурированный слой расположен на композиционной основе, образованной матричным связующим и функциональными компонентами различного назначения. При введении в композит армирующих волокон их функции реализуются в большей мере вследствие формирования наноструктурированного приповерхностного слоя и уменьшения вероятности образования и развития микротрещин

под действием механических, термических, термомеханических напряжений, возникающих вследствие действия эксплуатационных факторов.

Сочетание различных технологических приемов введения наноразмерных частиц в состав композиционного материала, например, диффузионная обработка гранул компонентов (наполненных и ненаполненных) и изделия, полученного из этих гранул, позволяет получать структуру композита с оптимальной организацией на различных уровнях. Такая структура формирует предпосылки для реализации синергетических эффектов в различных механизмах их проявления. Например, как показано выше, в смесевых композитах на основе термопластичных компонентов или в композитах, содержащих функциональные (армирующие или иные) компоненты, наряду с достижением повышенных параметров деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик проявляется технически значимый эффект повышения стойкости к термоокислительному старению, который, в ряде случаев, определяет параметры эксплуатационного ресурса и надежности металлополимерной системы заданного конструктивного исполнения. При этом необходимо подчеркнуть, что эффект повышения стойкости к воздействию термоокислительных сред проявляется не только при диффузионном введении антиоксидантов [21], а и при введении диффузионным способом наноразмерных частиц различного состава и строения.

Установленные закономерности формирования структуры смесевых композитов на основе термопластичных полимеров позволили разработать составы композиционных материалов для изготовления изделий различных металлополимерных конструкций – покрытий для узлов трения карданных валов и токарных патронов, элементов запорной и регулирующей арматуры, применяемой в трубопроводах низкого давления.

Установленные закономерности реализуются при использовании промышленного технологического оборудования – смесителей, экструдеров, термопластавтоматов, что позволяет использовать полученные данные в практическом материаловедении.

Заключение

Рассмотрена методология реализации принципа многоуровневого модифицирования при получении компонентов металлополимерных систем с повышенными параметрами эксплуатационных характеристик. Показано, что для композитов на основе полиамидов, содержащих функциональные компоненты (армирующие волокна, антипирены), целесообразно введение наноразмерных частиц путем предварительной диффузионной обработки гранулированных полуфабрикатов в водных растворах терморазлагающихся прекурсоров. При применении такой технологии реализуется синергический эффект повышения параметров устойчивости к горению и стойкости материалов к воздействию термоокислительных сред при сохранении высоких значений параметров деформационно-прочностных характеристик.

Для композитов, полученных термомеханическим совмещением алифатических полиамидов с различным строением и массой молекулярной цепи, эффективно введение в состав наноразмерных углеродсодержащих частиц (коллоидно-графитового препарата С-1, шихты детонационного синтеза баллистических порохов, углеродных нанотрубок, УДА), которые способствуют формированию структуры, обеспечивающей повышенные параметры эксплуатационных характеристик (адгезионных, триботехнических, деформационно-прочностных) при одновременном увеличении стойкости к термоокислительному старению. Дополнительное модифицирование полуфабрикатов (гранул или порошков) формиатом меди методом диффузионной обработки способствует увеличению параметров комплекса эксплуатационных характеристик.

Предложен механизм реализации принципа многоуровневого модифицирования в наполненных и смесевых композитах, заключающийся в формировании оптимальной структуры на различных уровнях организации – межмолекулярном, надмолекулярном и межфазном – благодаря формированию пространственной сетки адсорбционных физических связей между наночастицами и активными центрами полимерных макромолекул. Наличие таких связей в сочетании с функциональным действием компонентов, введенных в состав композита, создает предпосылки для реализации синергического эффекта повышения значений параметров эксплуатационных характеристик.

Перспективной технологией введения наноразмерных частиц в состав композиционного материала или изделия из него является диффузионная обработка полуфабрикатов или изделий в растворах модификаторов.

Список использованных источников

1. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004. – 519 с.
2. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020 г. / Национальная комиссия по устойчивому развитию Республики Беларусь; редкол.: Я.М. Александрович [и др.]. – Минск: Юнипак, 2004. – 200 с.
3. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер [и др.]; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
4. **Кулезнев, В.Н.** Смеси и сплавы полимеров / В.Н. Кулезнев. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 216 с.
5. Полимерные смеси: в 2 т. / пер. с англ.; под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – Т. 1: Систематика. – 616 с.
6. Полимерные смеси: в 2 т. / пер. с англ.; под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – Т. 2: Функциональные свойства. – 605 с.
7. **Михайлин, Ю.А.** Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю.А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 822 с.
8. Металлополимерные изделия и материалы / под ред. В.А. Белого. – М.: Химия, 1979. – 312 с.
9. **Белый, В.А.** Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника, 1976. – 416 с.
10. Пластмассы со специальными свойствами: сб. науч. трудов / под общ. ред. Н.А. Лаврина. – СПб.: Профессия, 2011. – 344 с.
11. Принципы создания полимерных композиционных материалов / А.А. Берлин [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 240 с.
12. Промышленные полимерные композиционные материалы / пер. с англ.; под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
13. **Струк, В.А.** Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк. – Гомель, 1988. – 325 л.
14. Введение в физику наноконпозиционных машиностроительных материалов: монография / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 438 с.
15. **Щербаков, С.В.** Технология, конструирование и эксплуатационные свойства комбинированных машиностроительных материалов и изделий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.08 / С.В. Щербаков; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1983. – 32 с.

16. **Сысоев, П.В.** Научные основы создания полимерных и металлополимерных машиностроительных материалов с высоким сопротивлением фрикционной усталости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / П.В. Сысоев; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1981. – 36 с.
17. **Савкин, В.Г.** Роль структурной трибомеханики полимеров в создании композиционных самосмазывающихся материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / В.Г. Савкин; МИНХ и ГП им. Губкина. – М., 1984. – 35 с.
18. **Корецкая, Л.С.** Атмосферостойкость полимерных материалов / Л.С. Корецкая; под ред. В.А. Белого. – Минск: Наука и техника, 1993. – 206 с.
19. **Биран, В.В.** Создание и исследование композиционных антифрикционных материалов на основе полиимидов и модифицированных полиамидов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / В.В. Биран; Физ.-техн. ин-т АН БССР. – Минск, 1983. – 16 с.
20. **Гладышев, Г.П.** Стабилизация термостойких полимеров / Г.П. Гладышев, Ю.А. Ершов, О.А. Шустов. – М.: Химия, 1979. – 272 с.
21. **Мачюлис, А.Н.** Диффузионная стабилизация полимеров / А.Н. Мачюлис, Э.Э. Торнау. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 256 с.
22. **Гольдаде, В.А.** Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
23. **Рыскулов, А.А.** Разработка машиностроительных материалов на основе смесей металлополимеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / А.А. Рыскулов; ИММС АН БССР. – Гомель, 1990. – 201 л.
24. **Охлопкова, А.А.** Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01, 05.02.04 / А.А. Охлопкова; ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. – Гомель, 2000. – 295 л.
25. **Фойгт, И.** Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла / И. Фойгт; под ред. Б.М. Коварской. – Л.: Химия, 1972. – 544 с.

Avdeychik S.V., Antonov A.S., Struk V.A., Vorontsov A.S.

Realization of the multilevel modification principle in materials science and technology of polymer composites

The directions of realization of the principle of multilevel modification in materials science and technology of polymer composite materials on the basis of thermoplastics are considered. It is shown that the introduction of nanoscale particles of different structures and production technology into the composition of the composite makes it possible to transform the structure at various levels of the organization, that leads to the synergistic effect of increasing the parameters of tensiles, tribotechnical characteristics and resistance to the action of thermal-oxidative medium. The advanced technologies for the introduction of nanomodifiers in the composite is the diffusion treatment of components and products in precursor solutions. The composites with advanced characteristics for the use in engineering, chemical and mining industries have been developed.

Keywords: structural level, nanoparticles, synergistic effect, diffusion modification.

Поступила в редакцию 11.07.2017 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, завершаемое 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, psd, bmp, gif, cdr, wmf, psd). Каждая таблица должна иметь заголовок, а рисунок – подписанную надпись. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.
7. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type». Все обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
8. Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.
9. Оформление списка использованных источников должно соответствовать требованиям ГОСТ 7.1-2003. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Список должен содержать зарубежные публикации в данной области (при их наличии).
10. 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, psd, 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-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:

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

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

Телефоны:

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

(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь

E-mail: onti@sipr.by

<http://www.sipr.by>