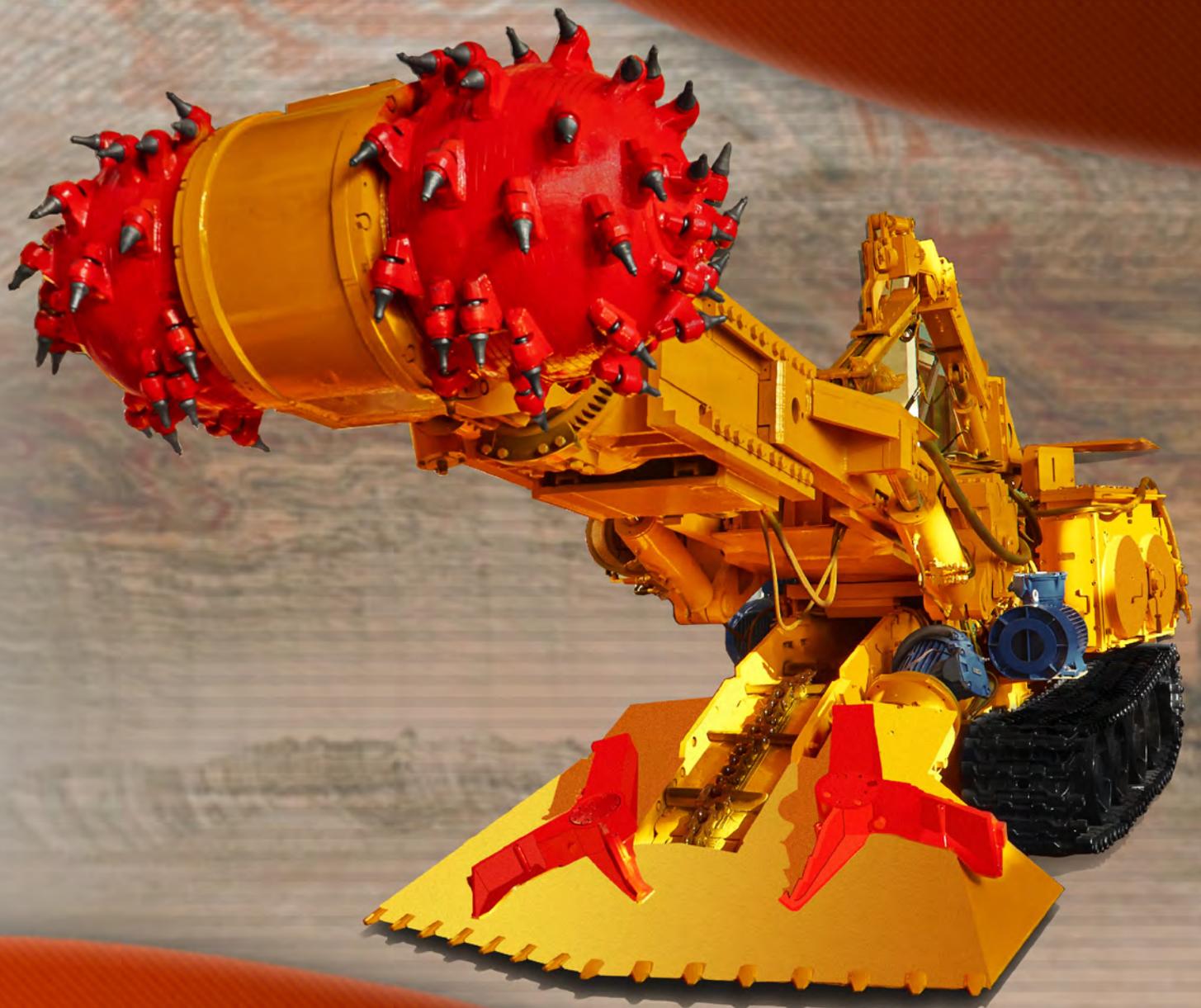


ISSN 1728-3841

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2015 №1



2015 №1

ГОРНАЯ МЕХАНИКА и машиностроение

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 1 2015

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Главный редактор
Щерба Владимир Яковлевич

Технический редактор
Барановский Анатолий Леонидович

Редакция:**Научно-технический журнал**

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

Журнал включен в Перечень научных
изданий ВАК Республики Беларусь

Заместитель главного редактора
Прушак Виктор Яковлевич

Ответственный секретарь
Зяц Ирина Михайловна

Редакционная коллегия:

Андрейко С.С. – доктор технических наук, проф.
Богданович П.Н. – доктор технических наук, проф.
Данилов В.А. – доктор технических наук, проф.
Журавков М.А. – доктор физ.-мат. наук, проф.
Зубов В.П. – доктор технических наук, проф.
Кислов Н.В. – доктор технических наук, проф.
Петровский Б.И. – доктор технических наук
Березовский Н.И. – доктор технических наук, проф.

Басинюк В.Л. – доктор технических наук
Бровка Г.П. – доктор технических наук, доцент
Губанов В.А. – доктор технических наук
Захаров Ю.Н. – доктор технических наук, проф.
Иванов В.П. – доктор технических наук, проф.
Оника С.Г. – доктор технических наук, проф.
Струк В.А. – доктор технических наук, проф.

**Адрес редакции:**

Республика Беларусь, 223710, г. Солигорск, ул. Козлова, 69
Тел.: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, факс: (+375 174) 26 28 37
E-mail: ontiiipr@tut.by

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Новокшенов В.Н., Данилова А.Ф., Усова Н.М.** Горизонтальное смещение земной поверхности в зависимости от максимального оседания в мульдe сдвигения 5
- Петровский Б.И., Поляков А.Л., Гарнишевский А.А., Прушак А.С., Тараканов В.А., Петровский А.Б.** Разработка требований по креплению тупиковых концевых частей лав, концевых частей лав без крепи сопряжения и сопряжений лав со штреками при слоевой и валовой выемке калийных пластов 9
- Липницкий Н.А., Усенко В.С.** Подбор марки бетона для крепления шахтного ствола по условию фильтрационной водонепроницаемости бетона 25
- Смычник А.Д., Усенко В.С., Липницкий Н.А.** Приближенный расчет гидрогеологических параметров водоносных горизонтов в слоистых пластах 33
- Калинцев С.В., Кременя К.И., Янушкевич В.Ф.** Использование электромагнитных методов для поиска углеводородных залежей 41
- Шпургалов Ю.А., Гец А.К., Бокшиц В.Н.** Компьютерное моделирование и оптимизация параметров технологии отработки участков шахтных полей 48

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Кучик А.С., Михаленя В.Д., Щерба Е.В.** Математическое моделирование процесса функционирования исполнительного органа проходческого комбайна на примере КИД-220М2. Часть 1. Разработка динамической и математической модели системы привода исполнительного органа комбайна, формирование исходных данных 52
- Иванов В.П., Вигерина Т.В., Кастрюк А.П.** Имитационное моделирование организации восстановления деталей 60

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Коломиец А.В., Неверов А.С., Власенко Д.А.** Композиционные материалы на основе минеральных вяжущих и полимерных добавок 69
- Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Никитин А.В., Ситкевич Ф.А.** Систематизация силикатных минералов, используемых при создании материалов различного назначения 82
- Овчинников Е.В., Лиопо В.А., Струк В.А., Дьячкова Л.Н., Эйсымонт Е.И., Голушко С.Н.** Низкоразмерные модификаторы для консистентных литиевых смазок 91

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

Подписано в печать 27.02.2015 г.
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 745. Усл. печ. л. 17,68. Тираж 120 экз.
Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слуцкая укрупненная типография»
223610, Республика Беларусь, Минская область, г. Слуцк, ул. М. Богдановича, 7.
ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 1 2015

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998

Issued four times a year

The journal is included in the list of scientific publications of Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus

Founder of the Journal:

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

Edition:

Editor-in-Chief

Shcherba Vladimir Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy

Prushak Viktor Yakovlevich

Technical Editor

Baranovsky Anatoly Leonidovich

Executive Secretary

Zayats Irina Mikhailovna

Editorial Board:

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

Basinyak V.L. – Ph.D.
Brovka G.P. – Ph.D., Assist. Professor
Gubanov V.A. – Ph.D.
Zakharov Y.N. – Ph.D., Professor
Ivanov V.P. – Ph.D., Professor
Onika S.G. – Ph.D., Professor
Struck V.A. – Ph.D., Professor



Editorial Address:

The Republic of Belarus, 223710, Soligorsk, Kozlova Street, 69
Tel: (+375 174) 26 35 32, (+375 174) 28 21 07, Fax: (+375 174) 26 28 37
E-mail: ontii@tut.by

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

- Novokshonov V.N., Danilova A.F., Usova N.M.** Dependence of horizontal shifts of a terrestrial surface on subsidence in a displacement trough 5
- Petrovsky B.I., Polyakov A.L., Garnishevsky A.A., Prushak A.S., Tarakanov V.A., Petrovsky A.B.** Development of support setting requirements for the longwall dead end parts, longwall end parts without interface roof support and longwall interfaces with drifts while slice and complete mining of potash seams 9
- Lipnitsky N.A., Usenko V.S.** Selection of the grade of concrete for shaft mounting according to filtration water resistance of concrete 25
- Smychnik A.D., Usenko V.S., Lipnitsky N.A.** Approximate estimation of hydrogeological parameters of water-bearing horizons in layered seams 33
- Kalintsev S.V., Kremenya K.I., Yanushkevich V.F.** Using an electromagnetic methods to search hydrocarbon deposits 41
- Shpurgalov Ju.A., Gets A.K., Bokshits V.N.** Computer simulation and parameters optimization of the sites mining technology of the mine fields 48

MACHINE-BUILDING

- Kuchik A.S., Mikhalenya V.D., Shcherba Ye.V.** The mathematic modeling for the functional process of the roadheader cutting device for KID-220M2 example. Part 1. The designing of dynamic and mathematic model for the transmission system of the roadheader cutting device and formation of initial data 52
- Ivanov V.P., Vigerina T.V., Kastruk A.P.** Simulation modeling of organization of parts reconditioning 60

MATERIALS ENGINEERING

- Kolomiets A.V., Neverov A.S., Vlasenko D.A.** Composite materials on the basis of mineral binding agents and polymeric additives 69
- Liopo V.A., Auvchinnikov Ye.V., Nikitin A.V., Sitkevich F.A.** Systematization of silicate minerals used in the creation of materials for various purposes 82
- Auvchinnikau Ye.V., Liopo V.A., Struk V.A., Dyachkova L.N., Eisymont Ye.I., Golushko S.N.** Nanomodifiers for consistent lubricants 91
-
-

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.834:622.838

**ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАКСИМАЛЬНОГО ОСЕДАНИЯ
В МУЛЬДЕ СДВИЖЕНИЯ**

Новокшнонов В.Н., Данилова А.Ф., Усова Н.М. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

Представлены результаты исследований процесса сдвижения и деформирования массива горных пород в условиях ведения горных работ на Старобинском месторождении калийных солей.

Введение

Исследование параметров процесса сдвижения и деформаций земной поверхности в зоне влияния горных работ проводится с целью обеспечения безаварийной эксплуатации наземных объектов посредством применения мер охраны, разрабатываемых при проектировании горных работ.

Основой для проектирования условий безопасного ведения горных работ является расчет ожидаемых величин сдвижения и деформаций земной поверхности, выполненный на горном предприятии по соответствующим методикам.

В большинстве случаев для подрабатываемых объектов наиболее опасными являются горизонтальные деформации земной поверхности. В условиях Старобинского месторождения калийных солей при изучении процесса сдвижения горных пород наиболее детально исследован характер деформирования земной поверхности. Параметры сдвижения пород внутри массива в настоящее время остаются менее изученными.

В связи с этим, проведение научных исследований с целью установления закономерностей деформирования массива горных пород и земной поверхности является актуальной научной и технической проблемой.

Результаты исследований

В массиве горных пород, подработанном горными выработками, образуются пустоты или, так называемое, выработанное пространство. Равновесие горных пород в подработанном массиве нарушается под действием сил гравитации, горные породы сдвигаются в сторону выработанного пространства, перемещаясь в вертикальном и горизонтальном направлениях с развитием деформаций оседаний, растяжений и сжатий.

Анализ результатов наблюдений за последние 15 лет в мульдах сдвижения на земной поверхности в условиях применения лав с валовой выемкой показал, что на Старобинском месторождении калийных солей проявляется достаточно устойчивая зависимость величины горизонтальных смещений земной поверхности от величины оседания в мульде сдвижения.

Исследованиями, выполненными в различных мульдах сдвижения на земной поверхности над очистными выработками, установлено, что величина максимального го-

ризонтального смещения ξ_{\max} точки земной поверхности, расположенной в краевой части главного сечения мульды сдвижения, находится в прямой зависимости от величины максимального оседания η_{\max} в ней (рисунок 1).

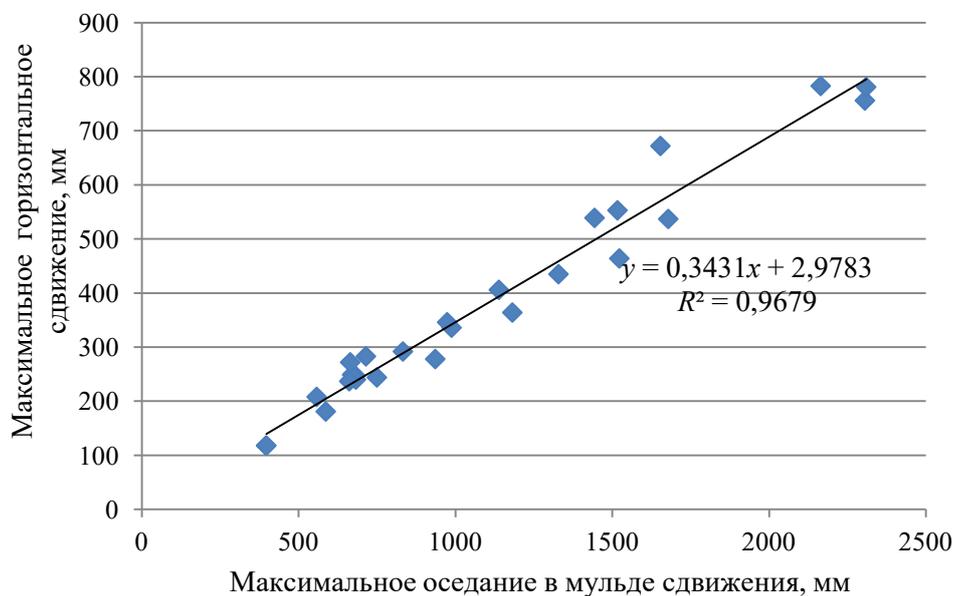


Рисунок 1 – Зависимость горизонтального сдвижения от оседания в мульде

Коэффициент перехода от максимального оседания (вертикального смещения) к горизонтальному смещению является практически одинаковой величиной для всех мульд сдвижения и характеризуется выражением (1) с величиной достоверности аппроксимации $R^2 = 0,0005$ (рисунок 2):

$$\xi_{\max} = 0,35 \times \eta_{\max}. \quad (1)$$

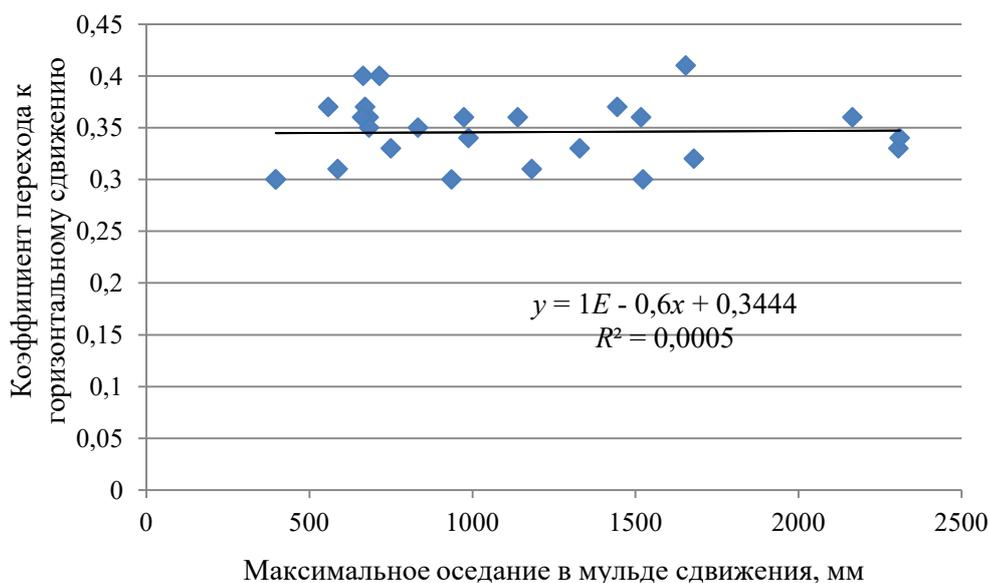


Рисунок 2 – Коэффициент связи оседания и горизонтального смещения

Эта зависимость подтверждается на земной поверхности в условиях применения столбовой и камерной систем разработки для краевой части мульды сдвижения при первичной и повторной подработках. Полученная зависимость подтверждается в период всего процесса формирования мульды сдвижения.

Необходимо отметить, что места расположения участков с наибольшим горизонтальным сдвижением и места с наибольшими относительными горизонтальными деформациями в сечении мульды сдвижения ориентированы достаточно четко, относительно створа постоянной границы очистной выработки.

Горизонтальные смещения точек земной поверхности постоянно нарастают по мере удаления от внешней границы краевой части мульды сдвижения. Участок расположения наибольшего горизонтального сдвижения примыкает к створу постоянной границы горной выработки в сторону выработанного пространства на расстояние до $0,01 \times H$ м.

Таким образом, выявленная закономерность соотношений величин вертикального и горизонтального сдвижения позволяет сравнительно быстро составить картину деформирования земной поверхности с указанными на ней подрабатываемыми сооружениями и определить необходимые меры охраны и допустимые параметры горных работ.

Согласно Указаниям по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей [1], величина максимального оседания в мульде сдвижения является функцией от вынимаемой мощности m , размера выработанного пространства D и глубины ведения горных работ H [1]:

$$\eta_{\max} = f(mD/H).$$

Наибольшее оседание в главном сечении мульды сдвижения на земной поверхности определяется по формуле:

$$\eta_{\max} = m \times q_0 \times K_n \times N_x \times N_y, \quad (2)$$

где: m – вынимаемая мощность пласта, м;

q_0 – относительная величина максимального оседания ($q_0 = 0,9$);

K_n – коэффициент извлечения в пределах вынимаемой мощности;

N_x, N_y – коэффициенты, учитывающие степень подработанности в направлении соответствующих осей координат мульды: N_x – в направлении оси ОХ; N_y – в направлении оси ОУ.

Необходимо отметить, что над движущейся границей очистной выработки тоже возникают горизонтальные смещения, но их величина и место проявления на земной поверхности определяется в сложной зависимости не только от величины оседания, но и от характера подвигания этой границы (забоя лавы) очистной выработки.

Заключение

В результате выполненных исследований выявлены дополнительные закономерности процесса сдвижения земной поверхности, использование которых совместно с

характером распределения безразмерных коэффициентов в мульде сдвижения [1] в сечениях, перпендикулярных к постоянным границам горных работ, позволяет сравнительно быстро составить картину деформирования земной поверхности на стадии проектирования мер охраны и безопасных условий ведения горных работ.

Полученные закономерности процесса сдвижения земной поверхности особенно важны при подработке протяженных объектов (железные дороги, подземные водо- и газопроводы, ограждающие дамбы и т.п.) и могут служить соответствующим дополнением к «Указаниям...» [1] при освоении новых участков Старобинского месторождения калийных солей.

Список использованных источников

1. Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей. – Солигорск - Минск, 2001. – 316 с.

Novokshonov V.N., Danilova A.F., Usova N.M.

Dependence of horizontal shifts of a terrestrial surface on subsidence in a displacement trough

Results of rock massif strata movement and surface deformations of the Starobin potassium salts deposit are presented.

Поступила в редакцию 04.12.2014 г.

УДК 622.28:622.861

РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ПО КРЕПЛЕНИЮ ТУПИКОВЫХ КОНЦЕВЫХ ЧАСТЕЙ ЛАВ, КОНЦЕВЫХ ЧАСТЕЙ ЛАВ БЕЗ КРЕПИ СОПРЯЖЕНИЯ И СОПРЯЖЕНИЙ ЛАВ СО ШТРЕКАМИ ПРИ СЛОЕВОЙ И ВАЛОВОЙ ВЫЕМКЕ КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ¹

Петровский Б.И., Поляков А.Л., Гарнишевский А.А., Прушак А.С. (Унитарное предприятие «Институт горного дела», г. Солигорск, Беларусь), Тараканов В.А., Петровский А.Б. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь)

В статье приведены результаты шахтных исследований проявлений горного давления в концевых частях лав и на сопряжениях лав со штреками при слоевой и валовой выемке Второго и Третьего калийных пластов Старобинского месторождения и разработаны требования по их креплению.

Введение

В настоящее время в связи с применением на рудниках ОАО «Беларуськалий» бесцеликовых технологических схем и технологических схем с оставлением между панелями или выемочными столбами целиков небольших размеров в обрабатываемых по таким технологиям лавах появились:

- тупиковые участки в целике за бортовым штреком отстающей смежной лавы длиной до 15-20 м;

- концевые участки без установки крепи сопряжения в бортовом штреке.

Концевая часть тупикового участка, на которой размещены 2-3 секции забойной крепи, получила название – тупиковая концевая часть лавы.

Бортовой штрек без установки крепи сопряжения служит только для проветривания лавы, и нахождение людей в нем запрещено. Примыкающий к такому бортовому штреку участок очистного забоя с 2-3 размещенными на нем секциями забойной крепи получил название – концевая часть лавы без крепи сопряжения.

В действующих на Старобинском месторождении нормативных и методических документах отсутствуют требования по креплению отмеченных выше концевых частей лав, а также сопряжений лав со штреками ввиду недостаточной изученности проявлений горного давления. Это обстоятельство явилось основанием для проведения специальных шахтных исследований в слоевых и валовых лавах.

На Втором пласте исследования выполнялись в двух валовых лавах:

- № 77 рудника 3 РУ;

- № 2с-1 рудника 4 РУ,

а на Третьем пласте – в пяти лавах:

- № 77в рудника 1 РУ, № 36в рудника 2 РУ и № 8-в-1 рудника 3 РУ, обрабатывающих IV сильвинитовый слой;

- № 76н рудника 1 РУ, обрабатывающей слои II, II-III и III валовым способом под выработанным пространством верхней лавы по IV сильвинитовому слою;

- № 43н рудника 2 РУ, обрабатывающей слои II, II-III и III без предварительной надработки лавой по IV сильвинитовому слою.

¹Результаты исследований и рекомендации не распространяются на двухслоевую выемку Второго калийного пласта с обрушением кровли при общей подготовке лав

Горно-геологические и горнотехнические условия отработки пластов на участках проведения шахтных исследований

Второй пласт на участках отработки его лавами № 77 и № 2с-1 залегает на глубине 664-773 м под углом 1-4° в северо-восточном направлении.

Мощность пласта составляет 2,19 м в лаве № 2с-1 и 2,36 м в лаве № 77. Кровля над подготовительными выработками относится к I типу по классификации, приведенной в работе [1].

Горно-геологические условия отработки Третьего пласта сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Горно-геологические условия отработки Третьего пласта

Горно-геологические условия	Рудник, горизонт, лава				
	рудник 1 РУ, горизонт –430 м		рудник 2 РУ, горизонт –445 м		рудник 3 РУ, горизонт –620 м
	лава № 77в	лава № 76н	лава № 36в	лава № 43н	лава № 8-в-1
	значение параметра				
Глубина залегания, м	635-712	671-676	579-595	627-642	722-728
Угол падения, град.	1-3 (северо- восток)	1-3 (северо- восток)	1-3 (юго- восток)	1-3 (юго- восток)	1-2 (юго- восток)
Тип кровли над подготовительными выработками	I, II, III	I, II, III	I, II, III	II	I
Тип кровли на обрушаемость:					
- непосредственной	труднообрушаемая	труднообрушаемая	труднообрушаемая	легкообрушаемая	легкообрушаемая
- основной	труднообрушаемая	труднообрушаемая	труднообрушаемая	труднообрушаемая	от легкообрушаемой до труднообрушаемой
Мощность пласта (слоя), м	1,26	1,94	1,20	1,93	1,17

Горнотехнические условия отработки Второго и Третьего пластов лавами по IV силвинитовому слою и слоям II, II-III и III приведены в таблице 2.

Более подробная информация о горно-геологических и горнотехнических условиях отработки Второго и Третьего пластов исследуемыми лавами содержится в работе [2].

Методика проведения шахтных исследований

Методика шахтных исследований включала в себя инструментальные и визуальные наблюдения. В инструментальные наблюдения входило выполнение следующих операций.

Таблица 2 – Горнотехнические условия отработки Второго и Третьего пластов

	Рудник, пласт, горизонт, лава									
	Третий пласт					Второй пласт				
	лава № 77в	лава № 76н	лава № 36в	лава № 43н	рудник 3 РУ, горизонт –620 м	рудник 3 РУ, горизонт –420 м	рудник 4 РУ, горизонт –440 м	лава № 2с-1	лава № 77	лава № 8-в-1
Горнотехнические условия	рудник 1 РУ, горизонт –430 м	рудник 2 РУ, горизонт –445 м	рудник 3 РУ, горизонт –620 м	рудник 4 РУ, горизонт –440 м	рудник 3 РУ, горизонт –420 м	рудник 4 РУ, горизонт –440 м	рудник 3 РУ, горизонт –420 м	рудник 4 РУ, горизонт –440 м	рудник 3 РУ, горизонт –420 м	рудник 4 РУ, горизонт –440 м
1	2	3	4	5	6	7	8	8	7	8
Длина лавы, м	237,0	163,0	203,0	101,0	200,0	200,0	257,0	257,0	200,0	257,0
Вынимаемая мощность пласта (слоев) $m_{вс}$, м	1,27	2,10	1,30	2,00	1,20	2,36	2,27	2,27	2,36	2,27
Ширина подготовительных выработок лавы при высоте 3,0 м:										
- конвейерного штрека	4,3	4,1	4,5	4,1	4,5	4,5	4,2	4,2	4,5	4,2
- транспортного штрека	3,0	3,0	3,0	3,0	-	-	-	-	-	-
- бортового вентиляционного штрека	-	3,0	-	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
- центрального вентиляционного штрека	3,0	-	3,0	-	3,0	-	-	-	-	-
Характеристика конечных частей лавы	без крепи сопряжения на транспортном штреке	тупик длиной 1,5 м за бортовым вентиляционным штреком	без крепи сопряжения на транспортном штреке	тупик длиной 4,5 м за бортовым вентиляционным штреком	без крепи сопряжения на бортовом вентиляционном штреке	стандартные	стандартные	стандартные	стандартные	стандартные

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
Тип забойной крепи	Фазос-09/15 Поз (99 секций) КЗ.03 (14 секций) КЗ.04 (3 секции) КЗ.05 (1 секция)	Фазос-16/24 Поз (91 секция)	Фазос-09/15 Поз (90 секций) КЗ.03 (8 секций) КЗ.04 (1 секция) КЗ.05 (1 секция)	Фазос-13/20 М (48 секций) Фазос-16/24 Поз (2 секции) Фазос-13/20 Поз (2 секции)	Фазос-08/13 Поз (96 секций) КЗ.04 (3 секции) КЗ.05 (1 секция)	Фазос-12/28 Поз (100 секций)	Фазос-08/13 М2 (129 секций)
Тип крепи сопряжения							
- на конвейерном штреке	Фазос-22/34 Поз (2 секции)	Фазос-15/31 Оз (2 секции)	Фазос-15/31 Оз (1 секция)	Фазос-15/31 М (1 секция)	Фазос-15/31 Оз (2 секции)	Фазос-15/31 Оз (2 секции)	Фазос-15/31 Оз (2 секции)
- на бортовом вентиляционном штреке	-	Фазос-16/24 (1 секция)	-	Фазос-15/31 М (1 секция)	-	Фазос-15/31 Оз (1 секция)	Фазос-15/31 Оз (1 секция)
- на центральном вентиляционном штреке	Фазос-22/34 Поз (1 секция)	-	БС-2.2 (1 секция)	-	БС-2.1П (1 секция)	-	-
<p>Примечания</p> <p>1. В лавах по IV сильвинитовому слою производилась подрубка почвы или кровли с увеличением вынимаемой мощности в концевых частях длиной 5-6 м от сопряжений со штреками: а) в лаве № 77в – у конвейерного и транспортного штреков – на 0,15 м; б) в лаве № 36в – у транспортного штрека – на 0,15 м; в) в лаве № 8-в-1 – у бортового вентиляционного штрека – на 0,30 м.</p> <p>2. Секции забойной крепи КЗ.03, КЗ.04 и КЗ.05 установлены в очистных забоях лав следующим образом: в лавах № 77в и № 36в, начиная от борта транспортного штрека в районе привода забойного конвейера, установлена крепь КЗ.05, затем – крепь КЗ.04 и за ней – КЗ.03; в лаве № 8-в-1, начиная от стенки бортового вентиляционного штрека, установлена крепь КЗ.05, затем – крепь КЗ.04.</p> <p>3. В лаве № 43н две секции крепи Фазос-16/24 Поз установлены в концевой части со стороны конвейерного штрека, и две секции крепи Фазос-13/20 Поз установлены в тупиковой концевой части за вентиляционным штреком.</p>							

а) Снятие показаний давления в гидростойках забойной крепи с помощью штатных манометров-индикаторов и в гидростойках крепи сопряжения с помощью самопишущих манометров М-72 с пересчетом в сопротивление P_d и P_c .

б) Выполнение измерений:

- отхода лавы от монтажного штрека;
- ширины незакрепленной полосы кровли от забоя до переднего конца перекрытия крепи b_n и ширины призабойного пространства B_3 в основной и концевых частях лавы;
- шага установки забойной крепи вдоль лавы S ;
- длины поддерживаемого крепью сопряжения участка штрека от забоя лавы до заднего конца перекрытия секции (секций) крепи сопряжения $l_{уст.}$;
- ширины штрека по кровле, поддерживаемой крепью сопряжения $b_{ш}$;
- высоты штрека в конце участка, поддерживаемого крепью сопряжения h ;
- конвергенции «кровля-почва» на сопряжении от забоя лавы до завального конца перекрытия крепи сопряжения;
- толщины штыба на почве штрека в месте установки крепи сопряжения t_n .

Визуальные наблюдения включали в себя оценку состояния кровли в призабойном пространстве лав и на их сопряжениях со штреками, а также изучение характера обрушения кровли за крепью.

Штатные манометры-индикаторы во всех лавах были подключены к каждой гидростойке забойной крепи, а самопишущие манометры – к каждой гидростойке крепи сопряжения.

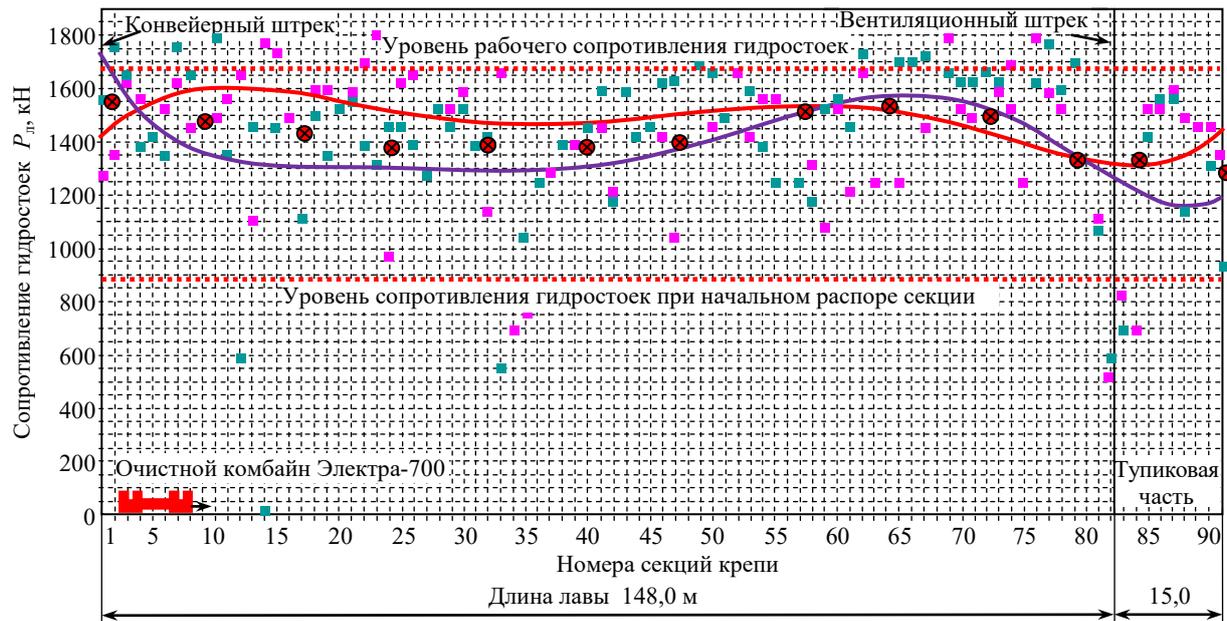
Результаты шахтных исследований в лавах и на сопряжениях

Обработка данных измерений по штатным манометрам-индикаторам после каждого посещения лавы заключалась в построении графиков нагруженности призабойного пространства по длине лавы в виде полиномиальных кривых по левым и правым гидростойкам крепи с нанесением на них заранее выбранных 10-12 мест для определения значений показателей P_d , B_3 , S и вычисления фактической удельной нагрузки на крепь – $Q_{л.ф.}$ После завершения исследований рассчитывались средние значения всех показателей в каждом выбранном месте, а затем производилось их усреднение отдельно в основной и концевых частях лавы.

В каждой лаве строилось не менее 12 графиков нагруженности призабойного пространства. В качестве примера один из таких графиков, построенный для лавы № 76н, показан на рисунке 1. Из рисунка видно, что распределение средних значений сопротивления гидростоек вдоль лавы носит равномерный характер. На большей части лавы, начиная от конвейерного штрека, расположенного со стороны выработанного пространства, сопротивление P_d составляет 1450-1550 кН, и лишь в непосредственной близости от тупиковой части лавы и в самой тупиковой части длиной 15 м за вентиляционным штреком, расположенным со стороны массива, значения P_d уменьшаются до 1280-1350 кН.

При обработке данных измерений на сопряжениях вычислялись средние значения всех показателей с суммированием сопротивлений P_c по всем гидростойкам – $P_{сум.}$ При поддержании сопряжения двумя секциями крепи находилось усредненное значение фактической удельной нагрузки на крепь.

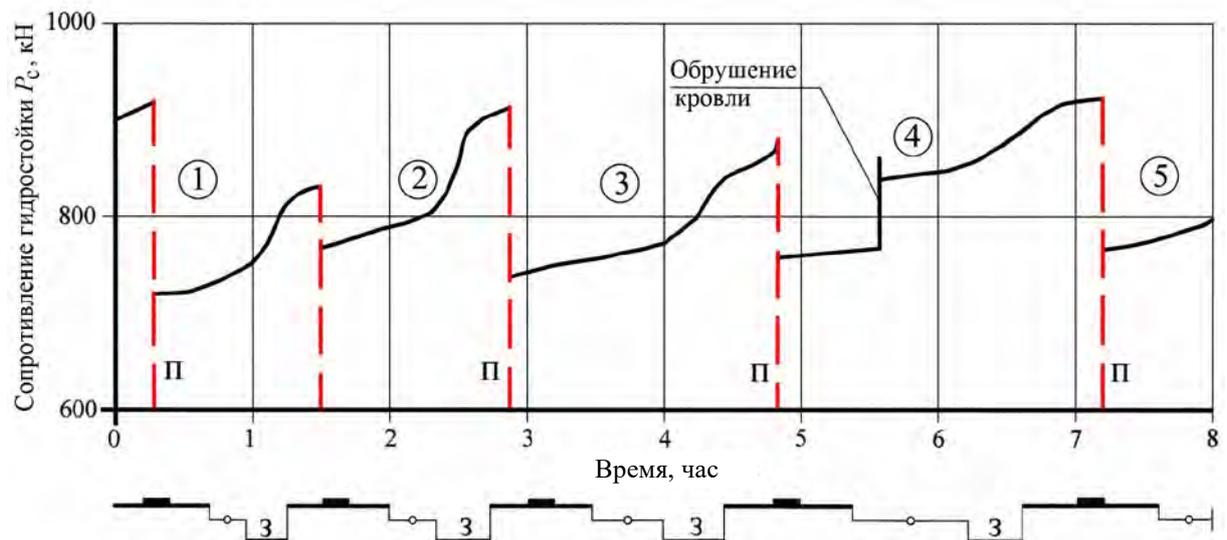
Изучение диаграмм самопишущих манометров М-72 позволяло устанавливать влияние выполняемых производственных операций на характер изменения сопротивления гидростоек.



■ – правые гидростойки; ■ – левые гидростойки; ● – места для определения $P_{л}, B_{з}, S$

Рисунок 1 – Характер нагружения забойной крепи Фазос-16/24 по длине лавы № 76н при ее отходе от монтажного штрека на 895 м

На рисунке 2 показано взаимодействие крепи Фазос-15/31 с боковыми породами на сопряжении лавы № 76н с конвейерным штреком в нескольких наиболее характерных циклах очистных работ.



3 – зарубка комбайна; — — — — очистная выемка; —○— — отгон комбайна и прочие операции;

П – передвижка крепи сопряжения; ①) – ⑤) – номера циклов очистных работ

Рисунок 2 – Взаимодействие крепи Фазос-15/31 с боковыми породами на сопряжении лавы № 76н с конвейерным штреком

Сразу после передвижки секции крепи сопряжения, которую производили после зарубки комбайна или в процессе выемки полосы полезного ископаемого, нарастания

сопротивления гидростоек P_c или вообще не происходило (цикл № 1), или оно шло с минимальной скоростью – не более 1 кН/мин. Во всех циклах очистных работ основное приращение сопротивления крепи (50-100 кН) наблюдалось в процессе зарубки комбайна и ведения им очистной выемки на расстоянии не более 20-25 м от конвейерного штрека, причем минимальное значение приращения сопротивления было зафиксировано в циклах после обрушения кровли на сопряжении (цикл № 4). В моменты обрушений кровли сопротивление гидростоек скачкообразно увеличивалось на 70-100 кН, а затем резко снижалось примерно на треть от приращенного значения. При передвижке крепи сопряжения разгрузка одной секции приводила к незначительному (10-20 кН) увеличению сопротивления гидростоек второй секции.

В таблице 3 приведены значения основных показателей проявления горного давления во всех исследуемых лавах и на их сопряжениях со штреками. В графе 5 вышеуказанной таблицы значения фактической удельной нагрузки на призабойную крепь $Q_{л.ф.}$ и ее несущей способности $q_{л.}$ получены с использованием формул:

$$Q_{л.ф.} = \frac{2P_{л.}}{B_3 \cdot S}, \text{ кН/м}^2, \quad (1)$$

$$q_{л.} = \frac{Q_{л.} \cdot K}{B_3 \cdot S}, \text{ кН/м}^2, \quad (2)$$

где $P_{л.}$, B_3 , S – значения показателей по результатам выполненных измерений (графы 2, 3, 4 таблицы 3);

$Q_{л.}$ – рабочее сопротивление секции крепи по технической характеристике, кН;

K – безразмерный коэффициент, учитывающий угол наклона стоек в зависимости от вынимаемой мощности пласта (слоя).

Анализ данных таблицы 3 показывает, что во всех лавах забойная крепь работает с запасом несущей способности $Z_{л.} = q_{л.}/Q_{л.ф.}$, причем в лавах, имеющих концевые части без крепи сопряжения и тупиковые концевые части, этот запас практически одинаков по всей длине очистных забоев. Так, в лавах № 77в, № 36в и № 8-в-1, обрабатывающих IV силвинитовый слой, запас несущей способности крепей КЗ.04 и КЗ.05, поддерживающих концевые части без крепи сопряжения, составляет в среднем 1,25, а крепей Фазос-09/15 Поз и Фазос-08/13 Поз, установленных в остальной части лав – в среднем 1,33. Такая же картина наблюдается и в лавах № 76н и № 43, обрабатывающих слои II, II-III, III с оформлением тупиковых концевых частей за вентиляционными штреками. Там показатель $Z_{л.}$ по всей длине очистных забоев изменяется в очень узком диапазоне – от 1,20 до 1,30 в лаве № 76н и от 1,38 до 1,40 в лаве № 43. При обработке Второго пласта лавами № 77 и № 2с-1 запас несущей способности забойных крепей в стандартных концевых частях и в основной части составляет в среднем 1,56 и 1,37.

В то же время полученные значения фактической удельной нагрузки на крепь $Q_{л.ф.}$ в лавах на Третьем пласте (за исключением лавы № 76н) превышают значения удельной нагрузки q , принятые в «Инструкции по применению систем разработки на Старобинском месторождении» [1] (в дальнейшем Инструкция), что необходимо учесть при переработке данного документа.

В лаве № 76н максимальные значения $Q_{л.ф.}$ в основной и концевых частях достигали 590 и 440 кН/м² соответственно, что подтверждает правильность назначенного в Инструкции значения удельной нагрузки на крепь нижних лав $q = 600$ кН/м² при труднообрушаемой кровле.

Таблица 3 – Значения основных показателей проявления горного давления в слоевых и валовых лавах и на их сопряжениях со штреками

Наименование частей лав и сопряжений	Значения показателей проявления горного давления										
	в лавах (усредненные значения)					на сопряжениях (средние значения)					
	$2P_{лв}$, кН	$b_{л}/B_{з}$, м	S , м	$q_{л}/Q_{л.ф.}$, кН/м ²	$P_{сум.}$, кН	$\ell_{уст.}$, м	$b_{шт}$, м	$h_{к}/h$, мм	$t_{п}$, мм	$q_{с}/Q_{с.ф.}$, кН/м ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
№ 77в, рудник 1 РУ, горизонт – 430 м											
основная часть лавы	2696	2,13/4,26	2,0	384/316							
концевая часть у конвейерного штрека	2636	2,12/4,25	2,0	385/310							
концевая часть у транспортно-го штрека без установки в нем крепи сопряжения	2752	2,00/4,43	2,1	352/296							
сопряжение лавы с конвейерным штреком					3920	4,16	3,0	56/2830	64	533/314	
сопряжение лавы с центральным вентиляционным штреком					1214	4,78	1,4	194/2858	60	497/181	
№ 76н, рудник 1 РУ, горизонт – 430 м											
основная часть лавы	2748	1,18/3,38	1,75	562/465							
концевая часть у конвейерного штрека	2638	1,70/3,90	1,75	487/386							
тушковая концевая часть за бортовым вентиляционным штреком	2560	2,20/4,40	1,75	432/332							
сопряжение лавы с центральным вентиляционным штреком					3528	4,81	3,0	80/2795	68	416/244	
№ 36в, рудник 2 РУ, горизонт – 445 м											
основная часть лавы	2703	1,80/3,93	2,0	416/344							

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
концевая часть у конвейерного штрека	2022	1,79/3,92	2,0	417/258						
концевая часть у транспортно-го штрека без установки в нем крепи сопряжения	3054	1,85/4,28	2,1	365/340						
сопряжение лавы с конвейерным штреком (1 секция)					1694	4,24	3,0	86/2867	69	236/133
сопряжение лавы с центральным вентиляционным штреком					1420	5,54	1,3	172/2877	65	446/197
№ 43, рудник 2 РУ, горизонт – 445 м										
основная часть лавы	2402	1,70/3,90	2,0	426/308						
концевая часть у конвейерного штрека	2386	1,96/4,16	2,0	400/287						
туликовая концевая часть за бортовым вентиляционным штреком	2487	1,70/4,30	2,0	386/276						
сопряжение лавы с конвейерным штреком (1 секция)					1816	5,09	1,8	62/2790	64	327/198
сопряжение лавы с бортовым вентиляционным штреком					1654	4,32	1,4	44/2869	71	496/273
№ 8-в-1, рудник 3 РУ, горизонт – 620 м										
основная часть лавы	2604	2,06/4,16	2,0	391/313						
концевая часть у конвейерного штрека	2100	2,46/4,56	2,0	360/248						
концевая часть у бортового вентиляционного штрека без установки в нем крепи сопряжения	2376	1,80/4,23	2,0	388/260						

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
сопряжение лавы с конвейерным штреком					3240	5,38	3,0	74/2815	63	372/201
№ 77, рудник 3 РУ, горизонт – 420 м										
основная часть лавы	2152	1,38/4,03	2,0	335/267						
концевая часть у конвейерного штрека	1884	1,34/3,99	2,0	338/236						
концевая часть у бортового вентиляционного штрека	2008	1,56/4,21	1,75	366/273						
сопряжение лавы с конвейерным штреком					2996	5,31	3,0	98/2773	67	377/188
сопряжение лавы с бортовым вентиляционным штреком					1570	4,98	1,4	102/2855	67	430/225
№ 2с-1, рудник 4 РУ, горизонт – 440 м										
основная часть лавы	1805	1,01/3,66	2,0	367/247						
концевая часть у конвейерного штрека	1630	0,94/3,59	1,75	427/259						
концевая часть у бортового вентиляционного штрека	1480	1,01/3,66	1,75	419/231						
сопряжение лавы с конвейерным штреком					4484	5,11	3,0	68/2807	61	391/292
сопряжение лавы с бортовым вентиляционным штреком					1896	5,20	1,4	51/2884	59	412/260

Высокое рабочее сопротивление секций забойных крепей (3000-3324 кН) позволяло сохранять кровлю призабойного пространства в основной и концевых частях лав в устойчивом состоянии (рисунок 3). Появляющиеся иногда вдоль забоя лавы № 76н тонкие (не более 2 мм) цикловые трещины в дальнейшем не расширялись, они чаще всего не достигали тупиковой концевой части и не осложняли поддержание призабойного пространства. При выходе за крепь непосредственная кровля (межслоевая пачка каменной соли III-IV) образовывала породные консоли, обрушающиеся с шагом от 2 до 9 м. Шаг обрушения непосредственной кровли в лаве № 43 и лавах № 77, № 2с-1 составлял 3-14 м и 2-6 м соответственно, а в лавах № 77в, № 36в и № 8-в-1 изменялся от 1,2 до 10 м.

Измерения на сопряжениях лав со штреками выполнялись с целью определения фактической удельной нагрузки на крепь $Q_{с.ф.}$ и проверки минимальной H_{min} и максимальной H_{max} конструктивной высоты крепи сопряжения условиям применения.

Проверка H_{min} и H_{max} производилась по формулам:

$$H_{min} \leq h_{min} (1 - \alpha \ell_3) - b - t_{п}, \text{ мм}, \quad (3)$$

$$H_{max} \geq h_{max} (1 - \alpha \ell_{п}), \text{ мм}, \quad (4)$$

где h_{min} , h_{max} – минимальная и максимальная высота штрека, мм, h_{max} принимается равной высоте штрека после его проходки, а h_{min} – по результатам измерений (графа 9 таблицы 3);

$\ell_{п}$, ℓ_3 – расстояние от забоя лавы до оси передней и задней стоек секции крепи сопряжения, замеряемое по почве штрека или основанию крепи, м;

b – запас раздвижности стоек на разгрузку крепи сопряжения от горного давления, $b = 50$ мм;

$t_{п}$ – суммарная толщина породной подушки под основанием секции крепи сопряжения, мм (графа 10 таблицы 3);

α – коэффициент опускания кровли определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{h_k}{h_{max} \cdot \ell}, \text{ м}^{-1}, \quad (5)$$

где h_k – опускание кровли (конвергенция «кровля - почва») на сопряжении от забоя лавы до завального конца перекрытия крепи сопряжения, мм (графа 9 таблицы 3).

Выполненные расчеты показали соответствие крепей Фазос-15/31, Фазос-22/34 Поз, БС-2.2 и БС-2.1П условиям их применения на всех сопряжениях лав со штреками.

При уменьшении высоты подготовительных выработок лав после их проходки на величину не более 145 мм при ширине 3 м и не более 227 мм при ширине 4,1-4,5 м (лава № 77) кровля штреков до подхода к сопряжениям и на самих сопряжениях сохраняла устойчивое состояние (рисунок 4), поэтому осложнений с выполнением концевых операций не возникало.

Расчет фактической удельной нагрузки на крепь сопряжений $Q_{с.ф.}$ и ее несущей способности q_c выполнялся по формулам:

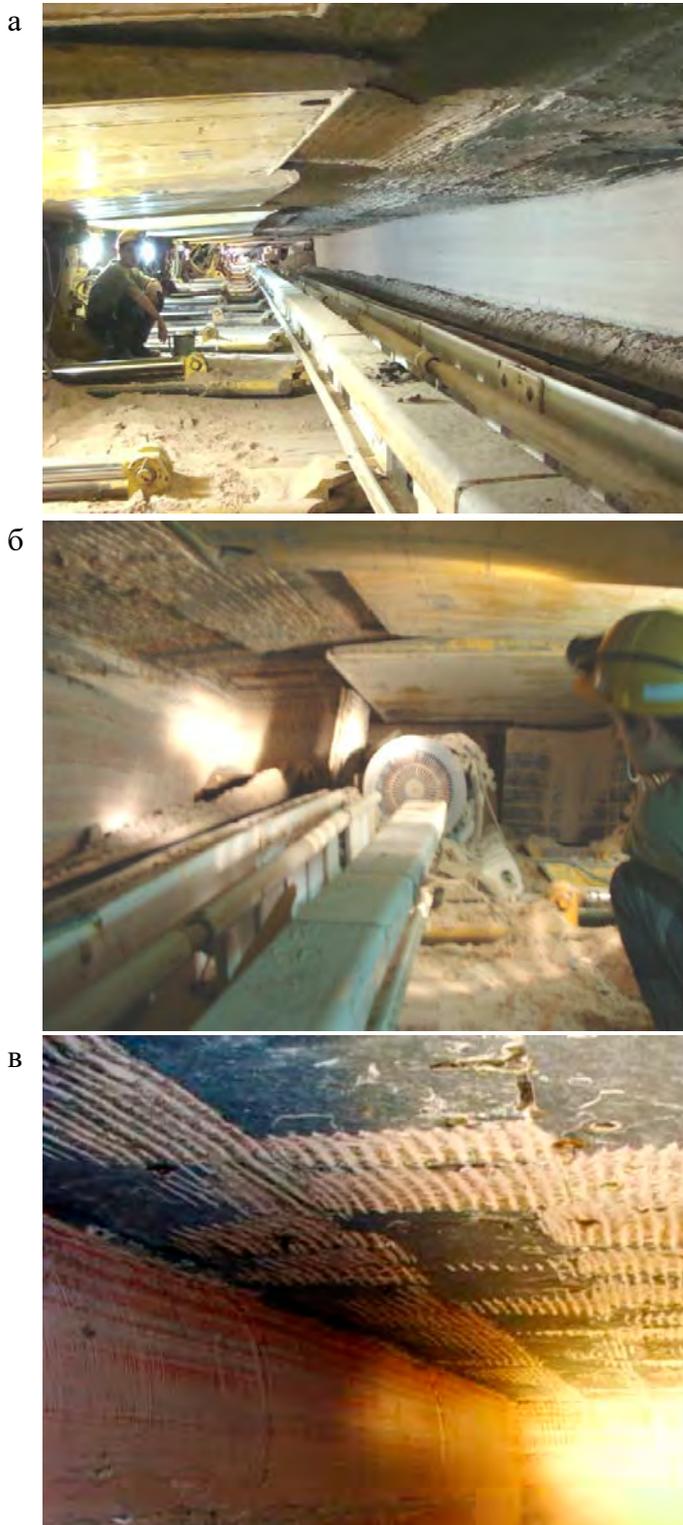
$$Q_{с.ф.} = \frac{P_{сум.}}{\ell_{уст.} \cdot b_{ш}}, \text{ кН/м}^2, \quad (6)$$

$$q_c = \frac{Q_{ск} \cdot N}{\ell_{уст.} \cdot b_{ш}}, \text{ кН/м}^2, \quad (7)$$

где $P_{\text{сум.}}$, $\ell_{\text{уст.}}$, $b_{\text{ш}}$ – значения показателей, полученные в результате выполненных измерений (графы 6, 7, 8 таблицы 3);

$Q_{\text{ск}}$ – рабочее сопротивление секции крепи по технической характеристике, кН;

N – количество секций крепи сопряжения, шт.



а – в центральной части лавы № 77в; б – в концевой части лавы № 77в без крепи сопряжения;
в – в тупиковой концевой части лавы № 76н

Рисунок 3 – Состояние кровли в призабойном пространстве лав

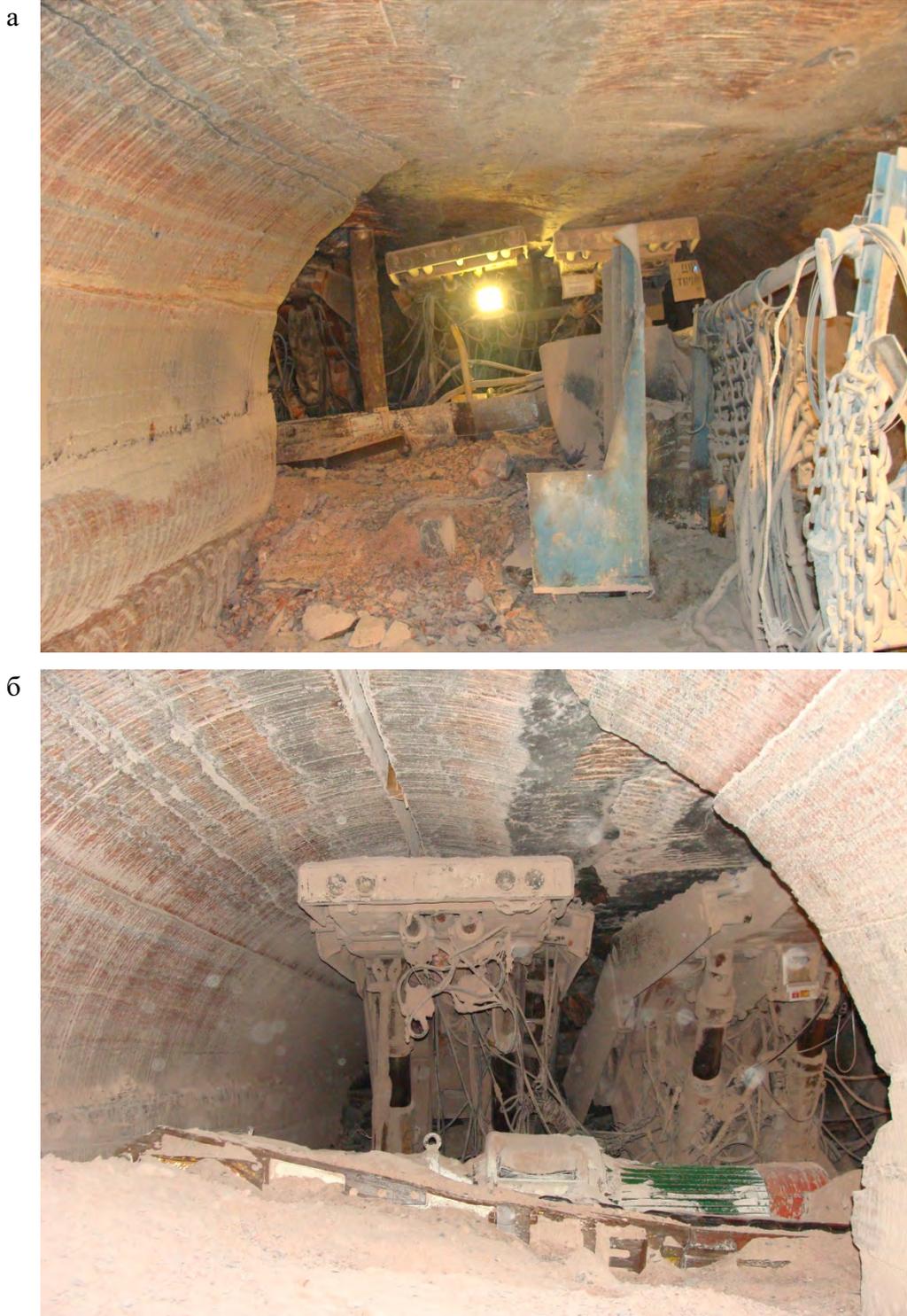


Рисунок 4 – Состояние кровли конвейерного (а) и вентиляционного (б) штреков на участке длиной 5-10 м перед сопряжениями с лавой № 77

Результаты расчетов приведены в таблице 3 (графа 11). Из таблицы видно, что полученная фактическая удельная нагрузка на крепь сопряжений $Q_{с.ф.}$ во всех лавах значительно ниже ее несущей способности q_c . На Третьем калийном пласте крепи со-

пряжений Фазос-15/31 Оз, Фазос-15/31 М и Фазос-22/34 Поз, установленные на сопряжениях лав с конвейерными и бортовым вентиляционным штреками, имеют запас несущей способности Z_c , равный 1,65-1,85.

Поддержание сопряжений лав № 36в и № 43н с конвейерными штреками одной секцией крепи Фазос-15/31 вместо двух на сопряжениях остальных лав с конвейерными штреками не привело к снижению Z_c , который составил 1,65 (лава № 43) и 1,77 (лава № 36в).

Самые большие значения показателя Z_c (2,74 и 2,26) получены на сопряжениях лав № 77в и № 36в с центральными вентиляционными штреками, вследствие того, что при расположении штреков под VI сильвинитовым слоем нагрузка на секции крепи со стороны кровли передавалась только на краевые части перекрытий. Если сравнивать показатели Z_c на сопряжениях лав с конвейерными и бортовыми вентиляционными штреками на Втором и Третьем калийных пластах, то можно говорить об очень небольшой разнице между ними. Вместе с тем, на Втором калийном пласте получен как самый низкий запас несущей способности на сопряжении лавы № 2с-1 с бортовым вентиляционным штреком ($Z_c = 1,58$), так и самый высокий – на сопряжении лавы № 77 с конвейерным штреком ($Z_c = 2,00$).

Заключение

Шахтными исследованиями получены данные, позволившие составить основные требования по креплению концевых частей лав и сопряжений лав со штреками при слоевой и валовой выемке калийных пластов Старобинского месторождения. При составлении требований учтен многолетний опыт отработки месторождения длинными очистными забоями и результаты ранее выполненных исследований.

1. Требования по креплению концевых частей лав.

1.1. Крепление тупиковых концевых частей лав следует осуществлять преимущественно таким же типом крепи, которая установлена в основной части лавы, а концевых частей лав без крепи сопряжения на штреке – преимущественно крепями типа КЗ.05 и КЗ.04.

1.2. Шаг установки секций крепи должен составлять 1,75-2,0 м, а ширина незакрепленной полосы кровли от забоя до переднего конца перекрытия $b_{п}$ после снятия комбайном полосы полезного ископаемого при задвинутых к конвейеру секциях крепи не должна превышать:

- 2,4 м при отработке слоев II, II-III и III нижней лавой в вариантах слоевой выемки Третьего калийного пласта;
- 2,8 м во всех остальных вариантах валовой выемки Второго калийного пласта и слоев II, II-III и III Третьего калийного пласта.

1.3. При проверке конструктивной высоты крепи и расчете ее несущей способности $q_{л}$ необходимо руководствоваться Инструкцией [1].

1.4. Несущая способность крепи $q_{л}$ в тупиковых концевых частях лав и концевых частях лав без крепи сопряжения на штреке должна быть не ниже удельной нагрузки q от горного давления, $q_{л} \geq q$.

Значения q принимаются равными:

- 300 кН/м² – в тупиковых концевых частях нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта с расположением концевых частей за пределами выработанного пространства верхних лав, в тупиковых концевых частях валовых лав по слоям II, II-III и III без их наработки лавой по IV сильвинитовому слою и в тупиковых концевых частях лав при валовой выемке Второго калийного пласта;

- в соответствии с Инструкцией [1] – в тупиковых концевых частях нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта с расположением их под выработанным пространством верхних лав;
- 250 кН/м^2 – в концевых частях лав по IV сальвинитовому слою без крепи сопряжения на штреке.

При ширине призабойного пространства $B_3 > 4,2$ м значения удельной нагрузки q должны быть скорректированы согласно Инструкции [1].

2. Требования по креплению сопряжений лав со штреками.

2.1. Сопряжения лав со штреками при слоевой выемке Третьего калийного пласта, валовой выемке слоев II, II-III, III без их надработки лавой по IV сальвинитовому слою и валовой выемке Второго калийного пласта следует поддерживать преимущественно механизированными крепями типа Фазос.

2.2. На сопряжениях лав с бортовыми штреками необходимо устанавливать две секции крепи, а на сопряжениях с центральными вентиляционными штреками и бортовыми штреками шириной 3,0 м и 3,2 м – одну секцию. Допускается установка в бортовых штреках шириной более 3,0 м и 3,2 м одной секции крепи сопряжения с шириной перекрытия не менее 1,4 м при отнесении кровли над бортовыми штреками ко II или III типу согласно классификации, приведенной в Инструкции [1]. Данное допущение не распространяется на бортовые штреки нижних лав при слоевой выемке Третьего калийного пласта с расположением штреков под выработанным пространством верхних лав. Ширина бортовых штреков при этом не должна превышать:

- 4,5 м в лавах по IV сальвинитовому слою и ненадрованных валовых лавах по слоям II, II-III и III;

- 4,1 м во всех остальных слоевых и валовых лавах.

2.3. Конструктивная высота крепи на сопряжениях слоевых и валовых лав со штреками должна удовлетворять условиям:

$$H_{\min} \leq h_{\min} (1 - \alpha \ell_3) - b - t_{\Pi}, \text{ мм},$$

$$H_{\max} \geq h_{\max} (1 - \alpha \ell_{\Pi}), \text{ мм},$$

где $h_{\min} = 2500$ мм; $h_{\max} = 3000-3200$ мм;

$\alpha = 0,008 \text{ м}^{-1}$;

$\ell_{\Pi} = \ell_3$ для однорядной крепи;

$b = 50$ мм;

$t_{\Pi} = 75$ мм.

2.4. Расчет несущей способности крепи сопряжения необходимо производить по формуле (7), в которой длина поддерживаемого крепью сопряжения участка штрека $\ell_{\text{уст.}}$ (расстояние от забоя лавы до завального конца перекрытия крепи, имеющего контакт с кровлей) берется после передвижки крепи

$$\ell_{\text{уст.}} = b_{\text{зп}} + \ell_{\Pi}, \text{ м}, \quad (8)$$

где $b_{\text{зп}}$ – расстояние от забоя лавы до переднего конца перекрытия принимается равным не более 2,8 м;

ℓ_{Π} – длина перекрытия крепи с учетом выдвинных и поджимных элементов, м.

Ширина части кровли штрека $b_{\text{ш}}$, поддерживаемой крепью сопряжения, принимается равной:

- для бортовых штреков шириной 4,1-4,5 м с привязкой кровли к кровле лавы или ниже кровли лавы с последующим оформлением кровли в концевой части лавы до уровня кровли штрека – ширине штрека минус 1,5 м;
- для центральных вентиляционных штреков и бортовых штреков шириной 3,0 м и 3,2 м с привязкой кровли выше кровли лавы – ширине перекрытия крепи;
- для центрального вентиляционного штрека с привязкой кровли к кровле лавы или ниже кровли лавы – ширине штрека.

2.5. Несущая способность крепи на сопряжениях слоевых и валовых лав со штреками q_c должна быть не ниже удельной нагрузки q от горного давления, $q_c \geq q$.

Значения q принимаются равными: 250 кН/м² – в бортовых штреках лав, 300 кН/м² – в центральных вентиляционных штреках лав по IV сильвинитовому слою.

Список использованных источников

1. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении. – Солигорск - Минск, 2010. – 152 с.
2. Обобщить результаты шахтных исследований и выдать рекомендации по выбору и расчету параметров установки крепи на сопряжениях лав со штреками, в тупиковых концевых частях лав, концевых частях лав без крепи сопряжения при слоевой и валовой выемке калийных пластов: отчет о НИР (заключит. по дог. № 02/09, этап 3.2) / ЧУП «Институт горного дела»; рук. В.А. Губанов; исполн.: Б.И. Петровский [и др.]. – Солигорск, 2011. – 122 с. – № ГР 20092318.

Petrovsky B.I., Polyakov A.L., Garnishevsky A.A., Prushak A.S., Tarakanov V.A., Petrovsky A.B.

Development of support setting requirements for the longwall dead end parts, longwall end parts without interface roof support and longwall interfaces with drifts while slice and complete mining of potash seams

The paper deals with results of shaft investigations of rock pressure manifestation in the longwall end parts and in the longwalls interfaces with drifts while slice and complete mining of the Second and the Third potash seams of the Starobin deposit. The requirements for their support setting are developed.

Поступила в редакцию 20.11.2014 г.

УДК 622.281.4-027.253(047.1)(476)

ПОДБОР МАРКИ БЕТОНА ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ШАХТНОГО СТВОЛА ПО УСЛОВИЮ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНА

Липницкий Н.А., Усенко В.С. (ООО «БХПЭнерго», г. Санкт-Петербург, Россия)

В статье приводится приближенная методика выбора марки бетона для крепления шахтных стволов по водонепроницаемости. Рассмотрен пример расчета.

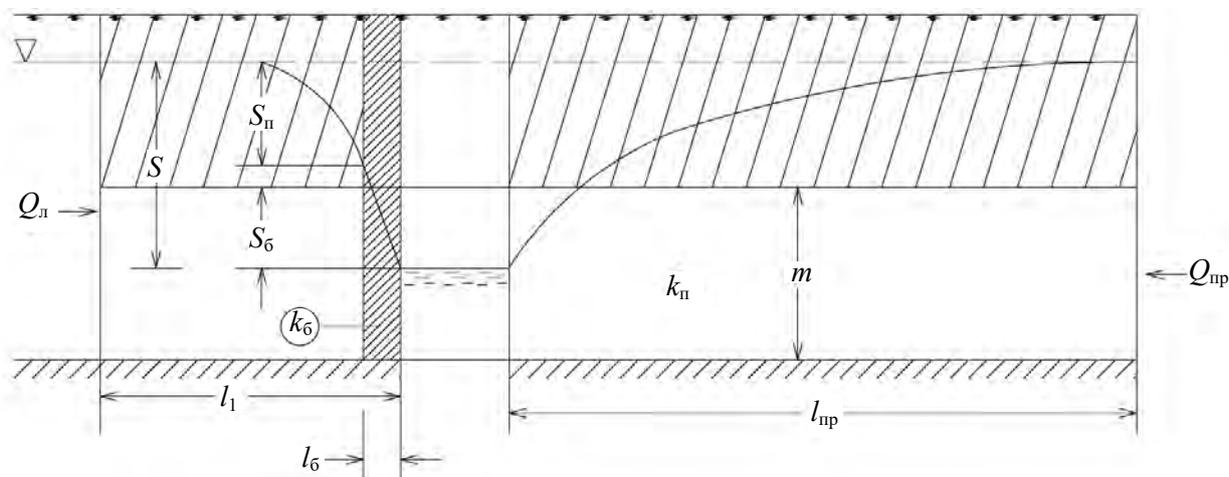
Введение

Подбор марки бетона по водонепроницаемости имеет важное значение при выборе бетона, применяемого для крепления ствола, в виду того, что на всех стадиях существования выработки фильтрационный приток регламентируется СНиП.

В статье показан принцип расчета и выбора марки бетона для крепления капитальной горной выработки. Окончательный выбор марки бетона должен быть уточнен прочностными расчетами.

Основная часть

Рассмотрим вначале напорную фильтрацию через перемычку, укрепленную на контуре стока бетонной стенкой (рисунок 1).



- S – общее понижение уровня напора, $S = S_п + S_б$; $S_п$ – потери на породной перемычке;
 $S_б$ – потери напора на бетонном креплении; $k_б$ – коэффициент фильтрации бетона;
 $k_п$ – коэффициент фильтрации пласта; $l_б$ – толщина бетонного крепления;
 l_1 – длина перемычки; $l_пр$ – приведенная длина перемычки при $Q_л = Q_пр$;
 $Q_л$ – приток к траншее слева (в случае закрепления стенки траншеи бетоном);
 $Q_пр$ – приток справа (стенка траншеи не закреплена); m – мощность водоносного пласта

Рисунок 1 – Схема притока воды в траншею: слева через перемычку, справа из неограниченного по простиранию пласта. Перемычка и пласт имеют одинаковые фильтрационные характеристики

Приведенная длина соответствует длине перемычки, когда фильтрационный приток к такой перемычке равен фильтрационным притокам к перемычке с бетонным

креплением, которые заменены породой с эквивалентным фильтрационным сопротивлением породы (грунта).

Для напорного фильтрационного (погонного) потока значение фильтрационного расхода Q можно записать в следующем виде:

$$Q = m \cdot k_{\text{п}} \cdot \frac{S}{l_{\text{пр}}} = m \cdot k_{\text{п}} \cdot \frac{S_{\text{п}}}{l_1} = m \cdot k_{\text{б}} \cdot \frac{S_{\text{б}}}{l_{\text{б}}}. \quad (1)$$

Из (1) можно получить:

$$l_{\text{пр}} = \frac{S}{S_{\text{п}}} \cdot l_1 \quad \text{и} \quad S_{\text{б}} = \frac{k_{\text{п}} \cdot l_{\text{б}} \cdot S_{\text{п}}}{k_{\text{б}} \cdot l_1}, \quad (2)$$

а также значение коэффициента фильтрации бетона:

$$k_{\text{б}} = k_{\text{п}} \cdot \frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{б}}} \cdot \frac{l_{\text{б}}}{l_1} = k_{\text{п}} \cdot \frac{S_{\text{п}}}{S - S_{\text{п}}} \cdot \frac{l_{\text{б}}}{l_1}. \quad (3)$$

Коэффициент фильтрации бетона определяется его маркой. По [1] даются следующие значения коэффициента фильтрации бетона в зависимости от его марки (таблица 1).

Таблица 1 – Марка бетона и коэффициент фильтрации

Марка бетона	B2	B4	B6	B8	B10	B12
Коэффициент фильтрации бетона $k_{\text{б}}$	свыше $7 \cdot 10^{-9}$ до $2 \cdot 10^{-8}$	св. $2 \cdot 10^{-9}$ до $7 \cdot 10^{-9}$	св. $6 \cdot 10^{-10}$ до $2 \cdot 10^{-9}$	св. $1 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-10}$	св. $6 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-11}$ и менее

Зная величину фильтрационного притока воды в траншею без ограждения бетонной стенкой Q и допустимую (по каким-либо соображениям) $Q_{\text{д}}$, оцениваем величину снижения расхода:

$$Q_{\text{д}} = \frac{Q}{n}, \quad (4)$$

где n – коэффициент снижения фильтрационного притока в траншею.

Допустимый приток $Q_{\text{д}}$ определяется техническими требованиями для сооружения траншеи. По этому расходу и коэффициенту фильтрации водоносного горизонта $k_{\text{п}}$, по формуле (3) в зависимости от толщины бетонной стенки $l_{\text{б}}$ определяем необходимый коэффициент фильтрации для бетона $k_{\text{б}}$, а по нему – марку бетона и проверяем величину расхода, поступающего в траншею.

$$Q_{\text{д}} = m \cdot k_{\text{б}} \cdot \frac{S - S_{\text{п}}}{l_{\text{б}}}, \quad (5)$$

где $S_{\text{п}}$ – понижение напора (уровня) в породе от области питания до бетонной стенки:

$$S_{\text{п}} = \frac{Q \cdot l_1}{m \cdot k_{\text{п}}}. \quad (6)$$

При этом Q_d по (5) должно быть менее допустимого Q_d , определяемого техническими требованиями для сооружения траншеи.

Далее рассмотрим аналогичную постановку задачи для шахтного ствола, изображенного на схеме (рисунок 2).

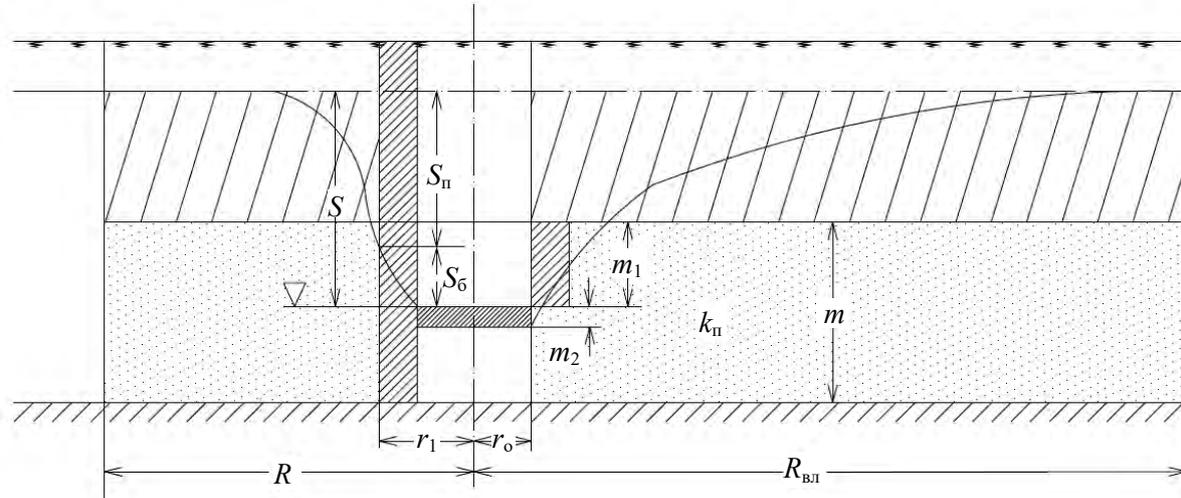


Рисунок 2 – Схема стационарного притока подземных вод в шахтный ствол, укрепленный бетонной крепью при заходке длиной m_2 , с постоянной скоростью проходки

На рисунке 2 слева показан ствол с креплением толщиной $\Delta r = r_1 - r_0$, а справа – момент проходки ствола с пройденной глубиной m_1 и глубиной заходки m_2 .

Дебит скважины для стационарной фильтрации в однородном напорном пласте описывается известной формулой:

$$Q = 2\pi \cdot k_n \cdot m \cdot \frac{S}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (7)$$

Если шахтный ствол рассматривать как ствол скважины большого диаметра, укрепленный бетонной крепью толщиной $\Delta r = r_1 - r_0$, то формально, по аналогии с зависимостью (2), можно записать (рисунок 2).

$$\ln \frac{R_{вл}}{r_0} = \frac{S}{S_n} \cdot \ln \frac{R_{вл}}{r_1} \quad \text{и} \quad S_6 = S_n \cdot \frac{k_n}{k_6} \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{R_{вл}}{r_0} - \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (8)$$

Зная величину допустимого притока в ствол Q_d , можно найти значение коэффициента фильтрации бетона по зависимости (3), подставив в нее соответствующие радиусы и понижения:

$$k_6 = k_n \cdot \frac{S_n \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}}{S_6 \cdot \ln \frac{R_{вл}}{r_1}} = k_n \cdot \frac{S_n}{S - S_n} \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{R_{вл}}{r_1}} \quad (9)$$

А по таблице 1 выбрать марку бетона.

Фильтрационный приток в ствол будет изменяться по мере углубления ствола и зависеть от величины заходки, местоположения заходки (глубины) и действующего понижения напора на дне заходки (в забое ствола).

Определять величину расхода, поступающего в ствол, следует по зависимости [2]:

$$Q = 2\pi \cdot k_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} \cdot G(f_0), \quad (10)$$

где $G(f_0)$ – функция притока;

$$f_0 = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2} \text{ – безразмерный параметр времени;}$$

$$a = \frac{k_{\text{п}} \cdot m}{\delta} \text{ – параметр пьезопроводности пласта;}$$

δ – коэффициент водоотдачи породы;

τ – время от начала проходки.

Функция притока $G(f_0)$ имеет вид:

$$G(f_0) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^{\infty} e^{-\lambda^2 f_0} \cdot \frac{2\lambda}{\lambda[I_0^2(\lambda) + N_0^2(\lambda)]} = \frac{2}{\ln 2,25 \cdot f_0} = \frac{1}{\ln \frac{1,5\sqrt{a \cdot \tau}}{r_0}}, \quad (11)$$

где I_0 и N_0 – цилиндрические функции Бесселя;

λ – переменная интегрирования.

Формула (10) в этом случае приобретает следующий вид [3]:

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}}}{\ln \frac{1,5\sqrt{a \cdot \tau}}{r_0}} = \frac{2\pi \cdot k_{\text{п}} \cdot m \cdot S_{\text{п}}}{\ln \frac{R_{\text{вл}}}{r_0}}. \quad (12)$$

Поскольку ствол (скважина) по степени вскрытия пласта несовершенен, значит приток происходит не только по его поверхности, но и через дно (забой), а положение вскрытия меняется по глубине, то есть при расчете поступления воды необходимо учитывать эти моменты.

Для учета этих факторов необходимо в знаменатель формулы (12) добавить слагаемое, учитывающее несовершенство ствола ζ . Это слагаемое можно определить по [3] по графику указанному на рисунке 3.

Чтобы учесть приток воды в ствол через его дно (забой), необходимо к длине заходки m_2 добавить величину $m_{\text{д}}$, которая эквивалента по пропускной способности дну (забою) ствола, т.е.:

$$\pi \cdot r_{\text{с}}^2 = 2\pi \cdot r_{\text{с}}; \quad m_{\text{д}} = \frac{r_{\text{с}}}{2},$$

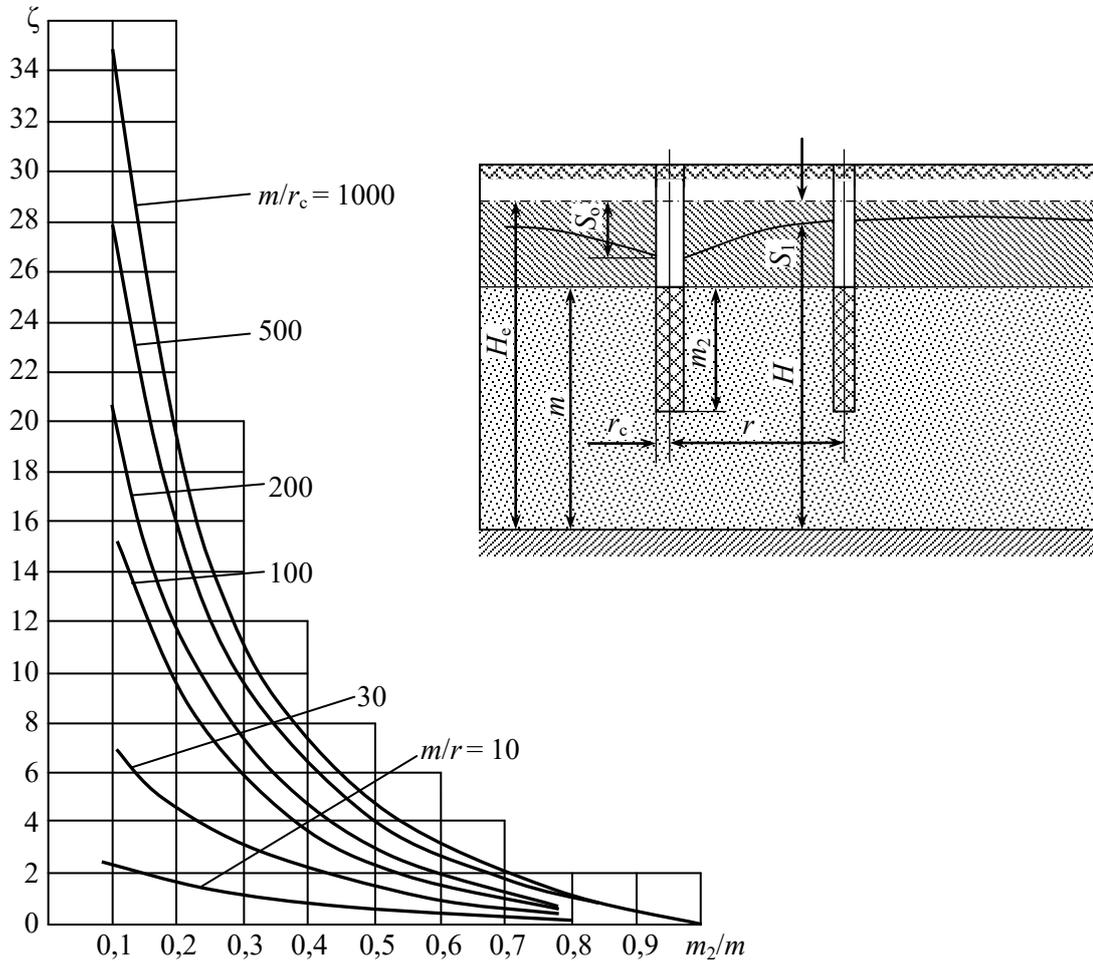
где $r_{\text{с}}$ – радиус шахтного ствола.

В этом случае приведенная длина заходки будет составлять величину:

$$m_{\text{д}} = m_2 + \frac{r_{\text{с}}}{2}.$$

При этом зависимость (12) приобретает вид:

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} \cdot m}{\ln \frac{R_{\text{вп}}}{r_0} + \zeta \left(m_2 + \frac{r}{2} \right)} \quad (13)$$



S_0 и S_1 – понижения, показанные на схеме притока к скважине;

H_c – напор над водоупором водоносного пласта в естественных условиях

Рисунок 3 – Графики дополнительного сопротивления ζ , обусловленного несовершенством скважины по степени вскрытия пласта (фильтр скважины в средней части пласта)

Величина $\zeta = f\left(m_2 + \frac{r}{2}\right)$ определяется по приведенному графику в зависимости от параметров $\frac{m_2}{m}$ и $\frac{m}{r_c}$.

Так как приток в ствол будет изменяться по глубине, то толщина крепления ствола $\Delta r = r - r_0$ должна быть переменной и такой, чтобы приток был меньше допустимой величины.

Расчитанная величина крепления ствола по условиям допустимого притока, должна затем уточняться, исходя из условий прочности и устойчивости крепления.

Пример расчета. Пусть радиус ствола $r_c = 4$ м, мощность водоносного слоя $m = 120$ м, величина заходки принимается 2 м, напор над пластом $S_0 = 125$ м, пьезопровод-

ность $a = 10^5 \text{ м}^2/\text{сут}$, время проходки водоносного горизонта $\tau_0 = \frac{120}{2} = 60 \text{ сут}$, коэффициент фильтрации пласта $k = 2 \text{ м/сут}$, $m_2 = 2 + \frac{r}{2} = 2 + 2 = 4$.

Определяем по графику (рисунок 3) величину ζ

$$\text{при } \frac{m}{r} = \frac{120}{4} = 30, \quad \frac{m_2}{m} = \frac{4}{120} = 0,033.$$

При этих данных имеем расчетную формулу притока:

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_n \cdot S(\tau) \cdot m}{\ln \frac{1,5 \cdot \sqrt{10^5 \cdot \tau}}{4}}, \quad (14)$$

по которой рассчитаны расходы, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры

		Номер по порядку							
Параметры		1	2	3	4	5	6	7	8
Количество пройденных заходов n , штук		2	6	10	20	30	40	50	60
Время проходки $\tau = \tau_1 \cdot n$, сут.		2	6	10	20	30	40	50	60
Понижение в пласте $S(\tau) = 125 + \tau \cdot n$, м		129	137	145	165	185	205	225	245
Радиус влияния $R_{\text{вл}} = 1,5 \sqrt{a \cdot \tau}$		670,820	1161,895	1500,000	2121,320	2598,076	3000,000	3354,102	3674,235
Расход Q^*	$\text{м}^3/\text{сут}$	12059,689	12385,582	12911,027	14397,083	15954,927	17535,455	19125,129	20718,623
	$\text{м}^3/\text{час}$	502,487	516,066	537,959	599,878	664,789	730,644	796,880	863,276
* $Q = \frac{2\pi \cdot k \cdot S(\tau) \cdot 120}{\ln \frac{R_{\text{вл}}}{r_0} + \zeta}$									

График зависимости притока от времени проходки приведен на рисунке 4. График зависимости радиуса влияния от времени проходки приведен на рисунке 5.

Величина расхода свидетельствует о необходимости применения специальных методов проходки (замораживание пород, тампонирование, кольматация водоносных горизонтов и др.). В данной таблице при определении притока в ствол пренебрегалось притоком через забетонированное ограждение на любой момент времени τ по сравнению с притоком через боковую поверхность заходки и дно (забой) ствола.

При полной проходке ствола и создании бетонного крепления, аналогично (1), можно также записать тождество:

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_n \cdot S_0 \cdot m}{\ln R_{\text{пп}} / r_0} = \frac{2\pi \cdot k_n \cdot S_n \cdot m}{\ln R_{\text{пп}} / r_1} = \frac{2\pi \cdot k_0 \cdot S_0 \cdot m}{\ln r_1 / r_0}, \quad (15)$$

где r_1 – внешний радиус бетонного крепления;

r_o – внутренний радиус ствола;

$R_{пр}$ – приведенный радиус влияния, когда бетонное крепление заменено исходной породой;

S_o – общее понижение;

$S_{п}$ – понижение в породе;

$S_б$ – понижение уровня в бетоне.

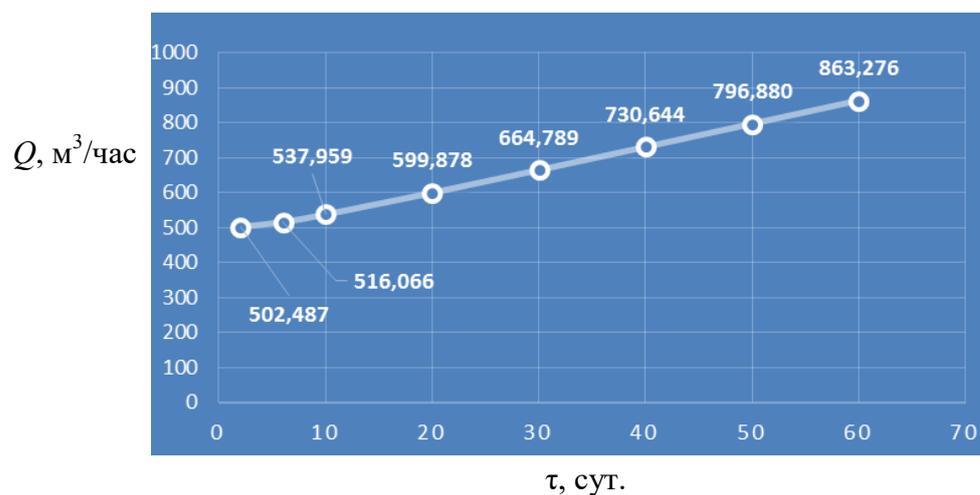


Рисунок 4 – График зависимости притока от времени проходки

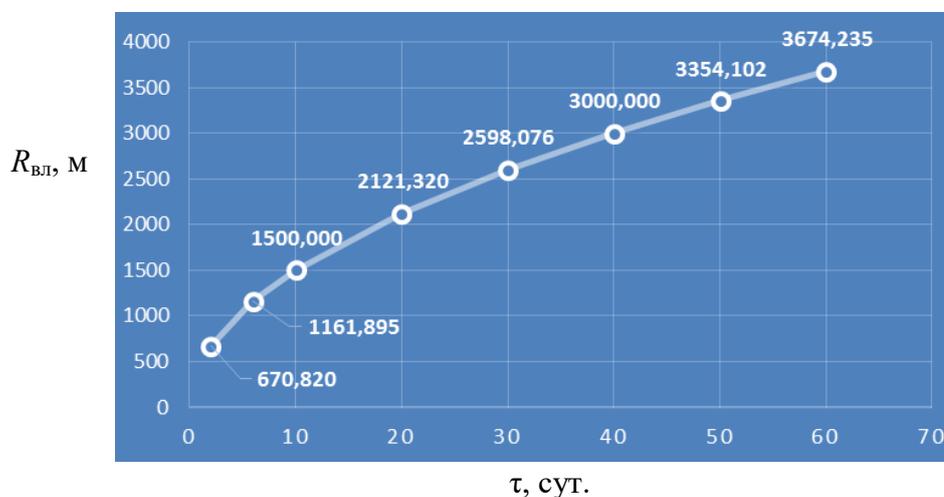


Рисунок 5 – График зависимости радиуса влияния от времени проходки

Из уравнения (15) можно записать:

$$k_6 = \frac{Q_d \cdot \ln r_1 / r_o}{2\pi \cdot S_б \cdot m} = \frac{Q_d \cdot \ln r_1 / r_o}{2\pi \cdot m \cdot (S_o - S_{п})} = \frac{Q_d \cdot \ln r_1 / r_o}{2\pi \cdot m \cdot S_o \left(1 - \frac{\ln R_{вл} / r_1}{\ln R_{вл} / r_o}\right)}, \quad (16)$$

так как из равенства (16):

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_п \cdot S_o \cdot m}{\ln \frac{R_{вл}}{r_o}} = \frac{2\pi \cdot k_п \cdot S_{п} \cdot m}{\ln \frac{R_{вл}}{r_1}}, \quad (17)$$

то получаем

$$\frac{S_{\text{п}}}{S_{\text{о}}} = \frac{\ln R_{\text{вл}}/r_1}{\ln R_{\text{вл}}/r_0}, \quad (18)$$

что дает:

$$k_6 = \frac{Q_{\text{д}} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}}{2\pi \cdot m \cdot S_{\text{о}} \left[1 - \frac{\ln R_{\text{вл}}/r_1}{\ln R_{\text{вл}}/r_0} \right]}. \quad (19)$$

В нашем случае имеем:

$$k_6 = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot \ln 4,3/4,0}{6,28 \cdot 120 \cdot 10^2 \cdot 145 \cdot 10^2 \left[1 - \frac{\ln 3760/4,3}{\ln 3760/4,0} \right] \cdot 3600} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ см/с.}$$

Вывод: толщину крепления можно уменьшать.

Уменьшим толщину крепления до 0,15 м. Тогда получим:

$$k_6 = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 0,037}{6,28 \cdot 120 \cdot 225 \cdot 3600 \cdot 0,22} = 2,2 \cdot 10^{-9} \text{ см/с.}$$

Это соответствует марке бетона В4.

Заключение

1. Предложена аналитическая методика выбора марки бетона по водонепроницаемости.
2. Приведен пример расчета по данной методике, подтверждающий ее работоспособность.
3. Расчеты по данной методике не представляют трудностей при ее использовании на практике.

Список использованных источников

1. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости: ГОСТ 12730.5-84. – Введ. 01.07.85. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, Донецкий ПромстройНИИпрект Госстроя СССР, Министерство транспортного строительства СССР, 1984.
2. Бочевер, Ф.М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод / Ф.М. Бочевер. – М.: Недра, 1968. – С. 95-99, 105-108.
3. Усенко, В.С. Вопросы теории фильтрационных расчетов дренажных и водозаборных скважин / В.С. Усенко. – М.: Колос, 1968. – С. 131-134, 138-145.

Lipnitsky N.A., Usenko V.S.

Selection of the grade of concrete for shaft mounting according to filtration water resistance of concrete

In this article the approximate method of selection of the grade of concrete for shaft mounting according to water resistance is considered. The example of calculation is provided.

Поступила в редакцию 28.11.2014 г.

УДК 622.5:556.3(047.1)(476)

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ В СЛОИСТЫХ ПЛАСТАХ

Смычник А.Д. (ООО «Стриктум» г. Калининград, Россия), Усенко В.С., Липницкий Н.А. (ООО «БХПЭнерго», г. Санкт-Петербург, Россия)

В статье предлагается методика приближенной оценки взаимодействия водоносных горизонтов, разделенных слабопроницаемым пластом.

Введение

При проведении опытных откачек с целью определения фильтрационных параметров водоносного многослойного комплекса и установления его водообильности, как правило, бурятся кусты скважин, состоящие из центральной и нескольких наблюдательных, в каждом из водоносных горизонтов.

Проводимые при этом откачки из центральной скважины и наблюдения за дебитом откачки и уровнями воды в скважинах позволяют по известным методикам производить расчеты необходимых фильтрационных характеристик и делать прогнозы по оценке запасов подземных вод и поведения водоносных горизонтов (предсказания режима подземных вод). Стоимость таких откачек весьма высокая, и их проведение не всегда возможно.

В данной работе сделана попытка оценки взаимодействия водоносных горизонтов по наблюдениям лишь в центральной скважине.

Основная часть

Рассмотрим схему притока подземных вод к несовершенной скважине, изображенной на рисунке.

Приток к скважине складывается из периферийного притока и перетекания из верхнего в нижний (или наоборот) пласт, в зависимости от понижения уровня в скважине, которое формируется под влиянием места расположения фильтра (для несовершенных скважин и висячих фильтров).

Предполагая нестационарную откачку воды из скважины, эксплуатируемую с постоянным дебитом, можно записать:

$$Q_{\text{скв}} = Q_0 + Q_{\text{п}}, \quad (1)$$

где Q_0 – приток с периферии напорного пласта;

$Q_{\text{п}}$ – приток за счет перетекания из пласта в другой пласт и поступления этой части воды в скважину (упругая или свободная водоотдача).

При постоянном отборе ($Q_{\text{скв}} = \text{const}$) воды из скважины понижение напорного уровня (или безнапорного при его понижении ниже кровли водоупора) будет изменяющимся во времени.

В этом случае формулу (1) для расхода скважины $Q_{\text{скв}}$ можно записать в виде суммы:

$$Q_{\text{скв}} = \frac{2\pi \cdot T_2 \cdot S(t)}{\ln R(t)/r_0} + \frac{1}{3} \pi \cdot R_{\text{вл}}^2(t) \cdot S(t) \cdot \frac{k_0}{m_0}, \quad (2)$$

где T_2 – номинальная проводимость нижнего водоносного пласта $T_2 = k_2 \cdot m_2$;

$S(t)$ – понижение напоров от статического уровня эксплуатируемого водоносного горизонта;

$R_{\text{вл}}$ – радиус влияния скважины, изменяющийся во времени t по зависимости

$$R_{\text{вл}} = n\sqrt{a \cdot t};$$

n – численный коэффициент ($n = 1,5-3,5$);

a – пьезопроводность пласта;

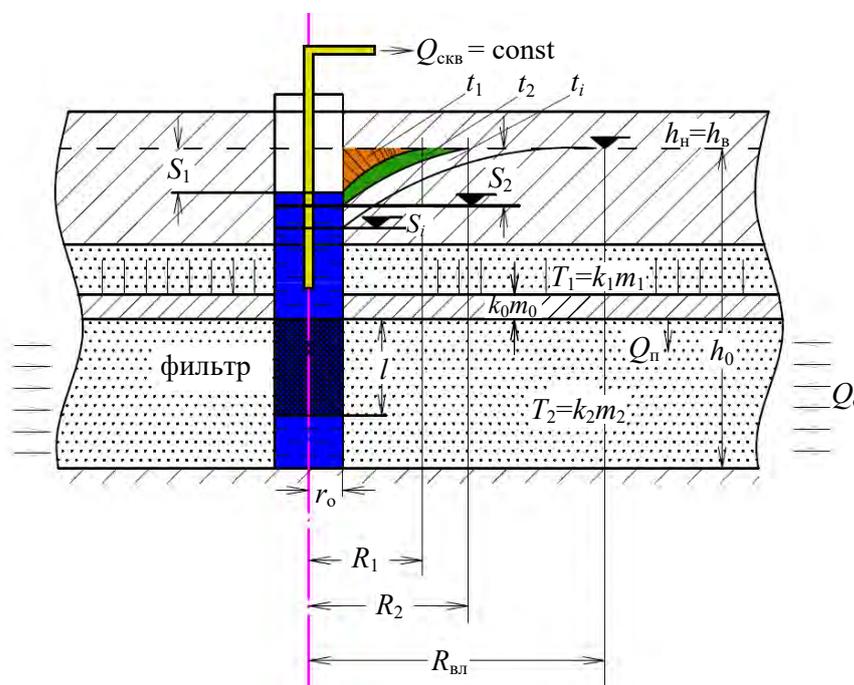
t – время от начала откачки;

k_0 – коэффициент фильтрации слабопроницаемого (разделяющего) пласта;

m_0 – мощность разделяющего пласта;

r_0 – радиус скважины;

$1/3$ – коэффициент, приближенно учитывающий объем воронки депрессии упругой водоотдачи, $(\frac{1}{3} \pi \cdot R_{\text{вл}}^2(t) \cdot S(t))$.



$Q_{\text{скв}}$ – дебит скважины (постоянный); $h_{\text{в}}$ и $h_{\text{н}}$ – напоры подземных вод от подошвы водоупора (в нашем случае они равны); k_1 и m_1 – соответственно коэффициент фильтрации и мощность верхнего водоносного горизонта; k_2 и m_2 – соответственно коэффициент фильтрации и мощность нижнего водоносного горизонта; h_0 – начальный напор подземных вод; l – длина фильтра

Рисунок – Схема притока подземных вод к несовершенной скважине в двухслойном водоносном комплексе

Величину перетекания можно определить по следующей зависимости:

$$Q_{\text{п}} = \frac{1}{3} \lambda \cdot k_0 \cdot \frac{\Delta S}{m_0}, \quad (3)$$

где λ – площадь воронки депрессии, учитываемая в перетекании для времени t_i ,

$$\lambda = \pi \cdot (R_{\text{вл}}^2 - r_0^2);$$

$R_{\text{вл}}$ – переменный радиус распространения перетекания;

$\frac{\Delta S}{3}$ – средняя величина действующего напора в промежутке времени.

Множитель $1/3$, вытекающий из свойства кривизны параболы, соответствует усреднению срезки напора $\Delta S_{\text{cp}} = \frac{\Delta S}{3}$.

Если начальные (статические) уровни в верхнем и нижнем горизонте не совпадают, то понижение ΔS необходимо рассчитывать с учетом поправки

$$\Delta S_o = h_o^H \pm h_o^B, \quad (4)$$

тогда

$$\Delta S = S(t_2) - S(t_1) \pm \Delta S_o, \quad (5)$$

где $S(t_2)$ или $S(t_1)$ берутся для того водоносного горизонта, из которого ведется откачка воды.

Зависимость для расхода перетекания можно в общем виде представить:

$$Q_{\text{п}} = \frac{\pi}{3} \cdot (R_{\text{вл}}^2 - r_o^2) \cdot k_o \cdot \frac{\Delta S}{m_o}. \quad (6)$$

Радиус влияния распространения снижения напора при откачке из скважины радиуса r_o с постоянным дебитом можно определить двумя путями:

- либо по формуле известной в гидрогеологии [1, 2]:

$$R_{\text{вл}} = n\sqrt{a \cdot t}; \quad (7)$$

- либо по формуле параболы, описывающей кривую депрессии [3]:

$$\Delta S^2 = 2p \cdot R, \quad R = \frac{\Delta S^2}{2p}, \quad (8)$$

где ΔS вычисляется для любого момента времени t ;

p – параметр параболы, приближенно принимаемый равным $2r_o$ (двойное расстояние от фокуса параболы до скважины).

Анализ реальных откачек из скважин и формулы (4) показывает, что перетекания с возрастанием времени будут расти до некоторого предела (когда радиус влияния стабилизируется).

Проанализируем долю притока воды в скважину за счет поступления с периферии пласта:

$$Q_o = \frac{2\pi \cdot k \cdot m \cdot \Delta S}{\ln(R(t)/r_o)}, \quad (9)$$

где k и m – соответственно коэффициент фильтрации и мощность испытываемого пласта, $T_{\text{н}} = k_2 \cdot m_2$;

ΔS – понижение уровня воды в скважине за промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ при откачке с постоянным дебитом.

Формулу (9) можно преобразовать следующим образом, используя зависимость (7), а именно:

$$\ln \frac{R(t_2)/r_o}{R(t_1)/r_o} = \ln \frac{n\sqrt{at_2}/r_o}{n\sqrt{at_1}/r_o} = \ln \left(\frac{\sqrt{t_2}}{\sqrt{t_1}} \right) = \ln(t_2/t_1), \quad (10)$$

тогда

$$Q_o = \frac{2\pi \cdot k \cdot m \cdot \Delta S}{\ln \frac{t_2}{t_1}}. \quad (11)$$

Суммарный приток будет складываться из двух составляющих: притока с периферии и перетекания из смежного пласта:

$$Q_{\text{скв}} = Q_o + Q_{\text{п}} = \frac{2\pi \cdot k_2 \cdot m_2 \cdot \Delta S}{\ln(t_2/t_1)} + \frac{\pi}{3} \cdot (R_{\text{вл}}^2 - r_o^2) \cdot \frac{k_o \cdot \Delta S}{m_o}. \quad (12)$$

Запишем (12) в следующем виде:

$$Q_{\text{скв}} = \frac{2\pi \cdot \Delta S \cdot k_2 \cdot m_2}{\ln(t_2/t_1)} \cdot \left[1 + \frac{\ln(t_2/t_1)}{6} \cdot \frac{R_{\text{вл}}^2 - r_o^2}{B^2} \right] = \frac{2\pi \cdot \Delta S \cdot T_{\text{сум}}}{\ln(t_1/t_2)}, \quad (13)$$

где $T_{\text{сум}} = k \cdot m \cdot \left(\frac{1 + \ln(t_2/t_1)}{6} \cdot \frac{R_{\text{вл}}^2 - r_o^2}{B^2} \right)$;

B – параметр перетекания

$$B = \sqrt{\frac{k_2 \cdot m_2 \cdot m_o}{k_o}}. \quad (14)$$

Величина, обратная B , называется коэффициентом перетекания b [1]

$$b = \frac{1}{B} = \sqrt{\frac{k_o}{k \cdot m \cdot m_o}}. \quad (15)$$

Имея данные наблюдений за откачками из скважин с постоянным дебитом $Q_{\text{скв}}$, можно приближенно оценить параметр $T_{\text{сум}}$ и долю расхода перетекания в общем расходе откачки при $Q_{\text{скв}} = \text{const}$ по формуле (здесь $Q_{\text{скв}} = Q_o$):

$$T_{\text{сум}} = k \cdot m = \frac{Q_{\text{скв}} \cdot \ln(t_2/t_1)}{2\pi \cdot \Delta S}, \quad (16)$$

так как в начальном периоде откачек в процессе перетекания доля перетекания практически равна нулю и следовательно $Q_{\text{скв}} = Q_o$.

При известной мощности пласта m , из которого производится откачка, можно определить и его коэффициент фильтрации.

С ростом продолжительности откачки можно найти и параметр перетекания B и коэффициент перетекания $b = 1/B$.

$$b = \sqrt{\frac{(R^2 - r_o^2) \cdot \ln(t_2 / t_1)}{6(Q_{\text{скв}} - Q_o)}}. \quad (17)$$

Расход перетекания при этом оценивается по зависимости:

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{скв}} - \frac{2\pi \cdot T \cdot \Delta S}{\ln(t_2 / t_1)}. \quad (18)$$

Если откачка производится из несовершенной скважины с параметрами несовершенства [4, 5], производится учет, так называемого, скин-эффекта – сопротивления фильтра [6]:

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2, \quad (19)$$

где ζ_1 – оценивает несовершенство по степени вскрытия пласта;

ζ_2 – оценивает несовершенство по характеру вскрытия.

Расчеты можно также вести по формуле для несовершенных скважин путем приведения их к совершенным и, используя приведенные выше формулы для совершенных скважин.

Методы приведения несовершенных скважин к совершенным сводятся к определению приведенного радиуса r_c совершенной скважины.

Воспользуемся следующим уравнением:

$$\ln(R / r_{\text{н}}) + \zeta^* = \ln(R / r_c), \quad (20)$$

при сохранении параметров: $Q_{\text{скв}}$, $R_{\text{вл}}$, ΔS для обеих скважин.

Из (20) получаем величину приведенного радиуса совершенной скважины

$$r_c = r_{\text{н}} \cdot e^{-\zeta^*}. \quad (21)$$

Значение ζ^* можно найти по графикам Н.Н. Веригина [4], или В.М. Шестакова [1].

Откачка подземных вод скважиной из взаимодействующих пластов с постоянным дебитом позволяет приближенно расчленить и оценить долю расхода, притекающего с периферии пласта, в котором заложена скважина, и долю перетекания из смежного водоносного горизонта, отделенного от основного разделяющим слабопроницаемым слоем.

Обращаясь к таблицам 1 и 2 наблюдений за откачкой и обработкой материалов откачки, заметим, что проводимость основного пласта, подсчитанная по формуле (9), является переменной величиной.

При этом в начальный период проводимость до некоторого момента времени сохраняет постоянную величину, а затем начинает возрастать также до постоянной величины при стабилизации понижения в скважине. Продолжительность этого периода зависит от мощности и коэффициента фильтрации разделяющего слоя.

Начальный период откачки соответствует истинной проводимости основного пласта $T_{\text{н}} = k_2 \cdot m_2$, а проводимость на момент стабилизации напоров в пласте отражает суммарную $T_{\text{сум}}$ проводимость с учетом перетекания.

Таблица 1 – Расчет перетекания в слоистых водоносных горизонтах при откачке из скважины А при следующих параметрах: $Q = 551,232 \text{ м}^3/\text{сут.}$, $T_{\text{ср}} = 7,37$, $R_{\text{вн}} = 183 \text{ м}$

№№ п/п	t, сут.	$t_i - t_1$, сут.	S_i , м	$\Delta S_0 = S_i - S_1$, м	$\ln t_i/t_1$	$(\ln t_i/t_1)/\Delta S_0$	$T = \frac{Q_{\text{ср}} \cdot (\ln t_i/t_1)}{(2 \cdot 3,14 \cdot \Delta S_0)}$	$Q_0 = \frac{(2 \cdot 3,14 \cdot T \cdot \Delta S_0)}{(\ln t_i/t_1)}$, $\text{м}^3/\text{сут.}$	$Q_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{ср}} - Q_0}{3}$, $\text{м}^3/\text{сут.}$
0	0	-	0,00						
1	0,001	-	6,04						
2	0,001	-	13,88						
3	0,002	0,0010	23,30	9,42	0,69315	0,07358	6,45876	629,00279	-77,77079
4	0,003	0,0020	25,01	11,13	1,09861	0,09871	8,66411	468,89742	82,33458
6	0,004	0,0030	27,30	13,42	1,38629	0,10330	9,06729	448,04764	103,18436
8	0,006	0,0050	28,02	14,14	1,79176	0,12672	11,12257	365,25556	185,97644
10	0,01	0,0090	28,70	14,82	2,30259	0,15537	13,63774	297,89255	253,33945
12	0,017	0,0160	29,17	15,29	2,83321	0,18530	16,26472	249,77866	301,45334
14	0,027	0,0260	29,74	15,86	3,29584	0,20781	18,24052	222,72276	328,50924
16	0,041	0,0400	30,25	16,37	3,71357	0,22685	19,91214	204,02527	347,20673
18	0,069	0,0680	30,78	16,90	4,23411	0,25054	21,99125	184,73622	366,49578
20	0,103	0,1020	31,40	17,52	4,63473	0,26454	23,22015	174,95924	376,27276
26	0,291	0,2900	32,84	18,96	5,67332	0,29923	26,26479	154,67778	396,55422
28	0,374	0,3730	33,28	19,40	5,92426	0,30537	26,80445	151,56365	399,66835
30	0,541	0,5400	33,78	19,90	6,29342	0,31625	27,75929	146,35027	404,88173
32	0,708	0,7070	34,05	20,17	6,56244	0,32536	28,55844	142,25496	408,97704
34	0,874	0,8730	34,35	20,47	6,77308	0,33088	29,04311	139,88101	411,35099
36	1,041	1,0400	34,54	20,66	6,94794	0,33630	29,51891	137,62634	413,60566
38	1,208	1,2070	34,71	20,83	7,09672	0,34070	29,90496	135,84969	415,38231
40	1,374	1,3730	34,80	20,92	7,22548	0,34539	30,31656	134,00531	417,22669
42	1,541	1,5400	34,85	20,97	7,34019	0,35003	30,72440	132,22648	419,22552
44	1,708	1,7070	34,91	21,03	7,44308	0,35393	31,06620	130,77171	420,46029
46	1,958	1,9570	34,96	21,08	7,57968	0,35957	31,56131	128,72027	422,51173
48	2,291	2,2900	34,97	21,09	7,73674	0,36684	32,20004	126,16692	425,06508
50	2,624	2,6230	35,00	21,12	7,87246	0,37275	32,71832	124,16833	427,06367
52	3,000	2,9990	35,00	21,12	8,00637	0,37909	33,27487	122,09153	429,14047

Таблица 2 – Расчет перетекания в слоистых водоносных горизонтах при откачке из скважины Б при следующих параметрах: $Q = 556,416 \text{ м}^3/\text{сут.}$, $T_{\text{ср}} = 7,37$, $R_{\text{вд}} = 183 \text{ м}$

№№ ш/п	t , сут.	$t_i - t_1$, сут.	S_i , м	$\Delta S_0 = S_i - S_1$, м	$\ln t_i/t_1$	$(\ln t_i/t_1)/\Delta S_0$	$T = \frac{Q_{\text{ср}} \cdot (\ln t_i/t_1)}{(2 \cdot 3,14 \cdot \Delta S_0)}$	$Q_0 = \frac{(2 \cdot 3,14 \cdot T \cdot \Delta S_0)}{(\ln t_i/t_1)}$, $\text{м}^3/\text{сут.}$	$Q_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{ср}} - Q_0}{\text{м}^3/\text{сут.}}$
1	0								
2	0,001	-	0,0	-	-	-	-	-	-
3	0,001	-	14,16	-	-	-	-	-	-
4	0,002	0,001	21,36	7,20	0,69	0,10	8,53	480,77	75,65
5	0,003	0,002	20,93	6,77	1,10	0,16	14,38	285,21	271,20
6	0,003	0,002	20,89	6,73	1,10	0,16	14,46	283,53	272,89
8	0,005	0,004	20,32	6,16	1,61	0,26	23,15	177,15	379,27
10	0,006	0,005	20,30	6,14	1,79	0,29	25,86	158,60	397,81
12	0,010	0,009	20,68	6,52	2,30	0,35	31,29	131,06	425,36
14	0,017	0,016	21,84	7,68	2,83	0,37	32,69	125,46	430,95
16	0,031	0,030	23,00	8,84	3,43	0,39	34,42	119,15	437,27
20	0,086	0,085	21,28	7,12	4,45	0,63	55,43	73,98	482,43
22	0,128	0,127	21,88	7,72	4,85	0,63	55,69	73,64	482,77
24	0,269	0,168	22,40	8,24	5,13	0,62	55,16	74,34	482,07
26	0,253	0,252	22,73	8,57	5,53	0,65	57,21	71,68	484,73
28	0,336	0,335	22,16	8,00	5,82	0,73	64,43	63,65	492,76
30	0,461	0,460	23,20	9,04	6,13	0,68	60,11	68,22	488,20
32	0,628	0,627	23,93	9,77	6,44	0,66	58,43	70,19	486,23
34	0,794	0,793	24,25	10,09	6,68	0,66	58,63	69,94	486,48
36	1,128	1,127	24,80	10,64	7,03	0,66	58,53	70,07	486,35
38	1,461	1,460	24,41	10,25	7,29	0,71	62,99	65,10	491,31
40	1,794	1,793	25,14	10,98	7,49	0,68	60,46	67,83	488,59
42	2,128	2,127	25,60	11,44	7,66	0,67	59,35	69,10	487,32
44	2,461	2,460	25,46	11,30	7,81	0,69	61,22	66,98	489,44
46	2,836	2,835	25,85	11,69	7,95	0,68	60,26	68,06	488,36

Анализ материалов таблицы показывает, что со временем (до стабилизации пьезометрического напора) приток с периферии пласта будет падать, а расход перетекания будет возрастать в связи с ростом радиуса влияния скважины до некоторой постоянной величины.

Анализ материалов таблиц откачек также показывает, что в скважине А приток из смежного пласта составляет величину:

$$k_A = \frac{551,23 - 429,14}{551,67} \approx 22 \% \quad (22)$$

от общего дебита скважины, а по скважине В:

$$k_B = \frac{556,42 - 488,67}{556,42} \approx 12 \% . \quad (23)$$

Из этих расчетов следует, что в скважине А наблюдаются более интенсивные перетекания, чем в скважине В, что необходимо учитывать как при оценке запасов подземных вод, так и при проектировании шахтных стволов и водозаборов.

Суммарную проводимость водоносного комплекса можно оценить по формуле (16), используя также материалы откачек.

Заключение

В работе получены расчетные зависимости по оценке взаимодействия пластов, и показан пример расчета фильтрационных параметров, используемых в проектных расчетах, проверенных на материалах реальных откачек.

Список использованных источников

1. **Шестаков, В.М.** Динамика подземных вод / В.М. Шестаков. – М., 1973. – 326 с.
2. **Бочеввер, Ф.М.** Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод / Ф.М. Бочеввер. – М.: Недра, 1968. – 325 с.
3. **Привалов, И.И.** Аналитическая геометрия / И.И. Привалов. – М.: Наука, 1966. – 279 с.
4. Методы определения фильтрационных свойств горных пород. – М.: Госстройиздат, 1962. – 180 с.
5. Справочное руководство гидрогеолога. – Л.: Недра, 1979. – Т. 1. – 512 с.
6. Основы гидрогеологических расчетов / Ф.М. Бочеввер [и др.]. – Л.: Недра, 1965. – 306 с.

Smychnik A.D., Usenko V.S., Lipnitsky N.A.

Approximate estimation of hydro-geological parameters of water-bearing horizons in layered seams

The method of approximate estimation of interaction of water-bearing horizons divided by weakly permeable seam is proposed.

Поступила в редакцию 19.01.2015 г.

УДК 553.9:550.837(047.1)(476)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОИСКА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Калинцев С.В., Кременя К.И., Янушкевич В.Ф. (УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Беларусь)

В статье проводится анализ частотных характеристик компонентов тензоров диэлектрической проницаемости среды над залежами углеводородов в различных режимах взаимодействия электромагнитных волн для уточнения параметров сигналов при поиске и выделении залежей углеводородов.

Приведены результаты исследования взаимодействия модулированных сигналов с различными параметрами с углеводородными залежами.

Введение

С данной целью использован широкий диапазон соотношений частот, амплитуд и параметров сигналов. На основе проведенного анализа даются рекомендации по использованию определенных соотношений параметров, обеспечивающих максимально точное выделение углеводородных залежей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке радиотехнических методов для обнаружения углеводородных залежей, а также для определения наиболее оптимальных методов их поиска.

Основная часть

В статье описаны исследования залежей углеводородов в процессе многочастотного воздействия на них электромагнитных волн с различными типами модуляции.

При одночастотной гармонической модуляции амплитуды и частоты радиосигнал имеет вид (1):

$$e(t) = E_{\omega} (1 + k_m \cos \Omega t) \cos[\omega t + \beta \cdot \cos \Omega t], \quad (1)$$

где E_{ω} – амплитуда сигнала несущей частоты ω ;

k_m – соответственно, коэффициент амплитудной модуляции;

β – индекс частотной модуляции;

Ω – частота информационного сигнала.

При воздействии сигнала со смешанной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) [1-3] составляющие скорости частиц будут определяться соотношениями (2):

$$\begin{cases} \mathcal{G}_x = \frac{e}{m} E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t) \frac{j\tilde{\omega}_4 + \nu}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} - \frac{e}{m} \omega_r E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t); \\ \mathcal{G}_y = \omega_r \frac{e}{m} \frac{E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} + \frac{e}{m} \frac{E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}; \\ \mathcal{G}_z = \frac{e}{m} \frac{E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}, \end{cases} \quad (2)$$

где m – масса электрона;

j – мнимая единица;

ν – частота несущего сигнала;

ω_r – гиротропная частота.

$$\tilde{\omega}_4 = \omega [1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]. \quad (3)$$

Плотности токов определяются выражениями (4):

$$\begin{cases} \delta_x = \varepsilon_0 \omega_{II}^2 E_x \frac{(1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} - \frac{\varepsilon_0 \omega_{II}^2 \omega_r E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}; \\ \delta_y = \frac{\varepsilon_0 \omega_{II}^2 \omega_r E_x (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2} + \frac{\omega_{II}^2 \varepsilon_0 E_y (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_4 + \nu)}{(j\tilde{\omega}_4 + \nu)^2 + \omega_r^2}; \\ \delta_z = \frac{\varepsilon_0 \omega_{II}^2 E_z (1 + \beta \cdot \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_4 + \nu}, \end{cases} \quad (4)$$

где ω_{II} – плазменная частота;

E_x, E_y, E_z – проекции вектора диэлектрической проницаемости на оси Ox, Oy, Oz .

При этом компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды для двух-частотного потока определяются выражениями (5) [4]:

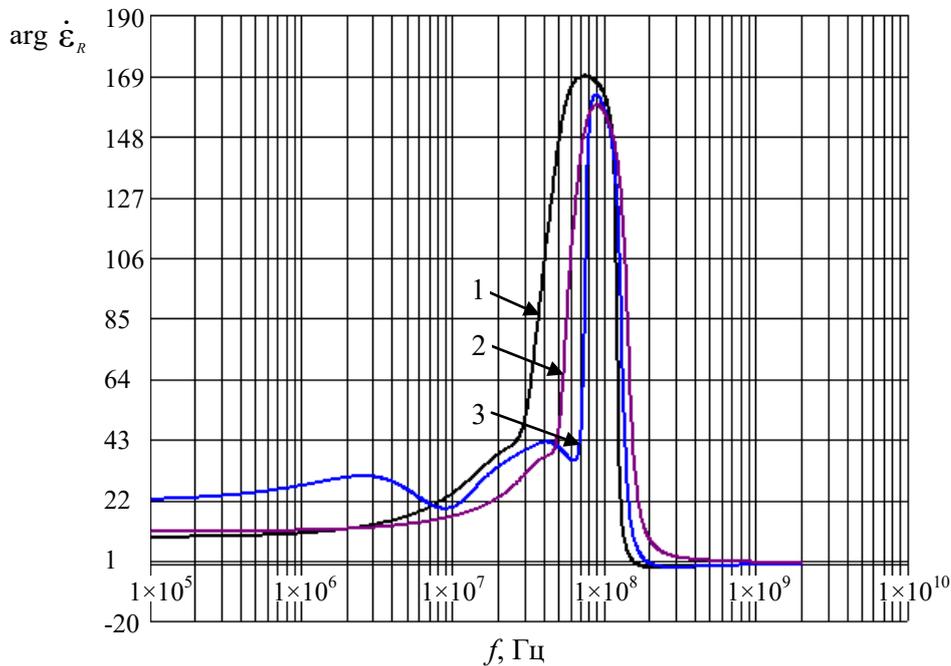
$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & \omega_{II}^2 \frac{\omega_{r_i}^2 - \omega^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{r_i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \right. \\ & \left. \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{II}^2 \nu_i}{\omega} \frac{\omega^2 + \nu_i^2 + \omega_{r_i}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{r_i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \right] + \\ & + \omega_{II}^2 \frac{(\omega_{r_i} - \nu_i)^2 - \omega^2}{((\nu_i + \omega_{r_i})^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} + \\ & + j \left[\frac{\omega_{II}^2 \nu_i}{\omega} \frac{\omega^2 + (\nu_i + \omega_{r_i})^2}{((\nu_i + \omega_{r_i})^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \right] \end{aligned} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & \frac{\omega_{II}^2 \omega_{r_i}}{\omega} \frac{\omega_{r_i}^2 - \omega^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{r_i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} - \frac{2j\nu_i \omega_{II}^2 \omega_{r_i}}{(\nu_i^2 + \omega_{r_i}^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} + \\ & + \frac{\omega_{II}^2 \omega_{r_i}}{\omega} \frac{(\omega_{r_i} - \nu_i)^2 + \nu_i^2}{((\nu_i + \omega_{r_i})^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} - \frac{2j\nu_i \omega_{II}^2 \omega_{r_i}}{((\nu_i + \omega_{r_i})^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 \nu_i^2} \end{aligned} \right\}; \\ \dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_r + \sum_{i=1}^2 \left\{ \begin{aligned} & \omega_{II}^2 \frac{1}{\nu_i^2 + \omega^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r k_m \Omega \sin \Omega t}{\omega(1 + k_m \cos \Omega t)} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{II}^2 \nu_i}{\omega} \frac{1}{\omega^2 + \nu_i^2} \right] + \\ & + \omega_{II}^2 \frac{1}{(\nu_i + \omega_{r_i})^2 + \omega^2} \end{aligned} \right\}. \end{cases} \quad (5)$$

Из (5) видно, что компоненты тензора включают в себя параметры смешанного модулированного сигнала: $K_m, \beta, \Omega, K_\omega$, и имеют более сложную зависимость, по сравнению с амплитудно-модулированными (АМ) и частотно-модулированными (ЧМ) сигналами [1, 5, 6].

Взаимодействие АМ-сигналов с анизотропной средой (АС)

Ввиду того, что вещественные части компонентов тензора не зависят от параметров АМ-сигналов, отсутствует необходимость их анализа. При этом фазовые компоненты ε_R и ε_L зависят от параметров АМ-сигнала [6, 7].

Частотные зависимости величины изменения фазового компонента тензора диэлектрической проницаемости среды $\arg \dot{\epsilon}_R$ представлены на рисунке 1.



1 – коэффициент модуляции $k_m = 0,1$, частота модуляции $F = 10$ МГц; 2 – $k_m = 0,5$, $F = 1$ ГГц;
3 – $k_m = 1$, $F = 1$ ГГц

Рисунок 1 – Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$

В диапазоне частот от 10^5 до $2 \cdot 10^7$ Гц значение $\arg \dot{\epsilon}_R$ изменяется незначительно. На отрезке $2 \cdot 10^7 \dots 2 \cdot 10^8$ Гц происходит увеличение фазы компонентов тензора. Максимальное изменение величины $\arg \dot{\epsilon}_R$ наблюдается в диапазоне частот $7 \cdot 10^7 \dots 1,5 \cdot 10^8$ Гц, где фаза скачком изменяется от значения $(165^0 \dots 170^0)$ до $(-1^0 \dots 0^0)$. Частота несущей, при которой фаза комбинированного элемента (КЭ) равняется нулю, лежит в пределах $(100 \dots 400)$ МГц. Установлено, что при изменении коэффициента АМ происходит изменение величины $\arg \dot{\epsilon}_R$. На отрезке частот $10^5 \dots 10^7$ Гц влияние значения k_m на фазу КЭ практически отсутствует.

В диапазоне частот $10^8 \dots 10^{10}$ Гц происходит существенное влияние коэффициента АМ на величину $\arg \dot{\epsilon}_R$. Так, при увеличении k_m наблюдается уменьшение частоты перехода фазы КЭ через нуль.

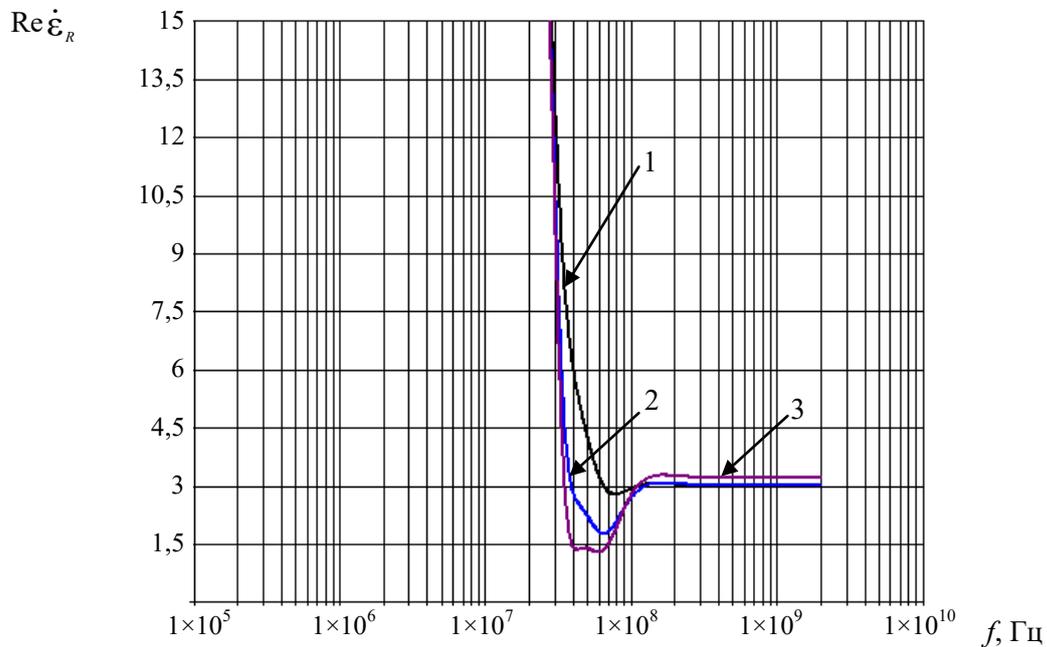
Анализ частотных зависимостей величины $\arg \dot{\epsilon}_L$ показал, что данные характеристики практически не отличаются от аналогичных зависимостей $\arg \dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$, т.е. $\arg \epsilon_R \approx \arg \epsilon_L$. Характеристики $\arg \epsilon_R = \varphi(k_m)$ и $\arg \epsilon_L = \varphi(k_m)$ практически совпадают.

Таким образом, применение АМ-сигналов не ведет к изменению КЭ $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$ и $\text{Re} \dot{\epsilon}_L$, однако оказывается влияние частоты несущей и коэффициента амплитудной модуляции на величину аргумента КЭ [1, 2, 5].

Взаимодействие ЧМ-сигналов с АС

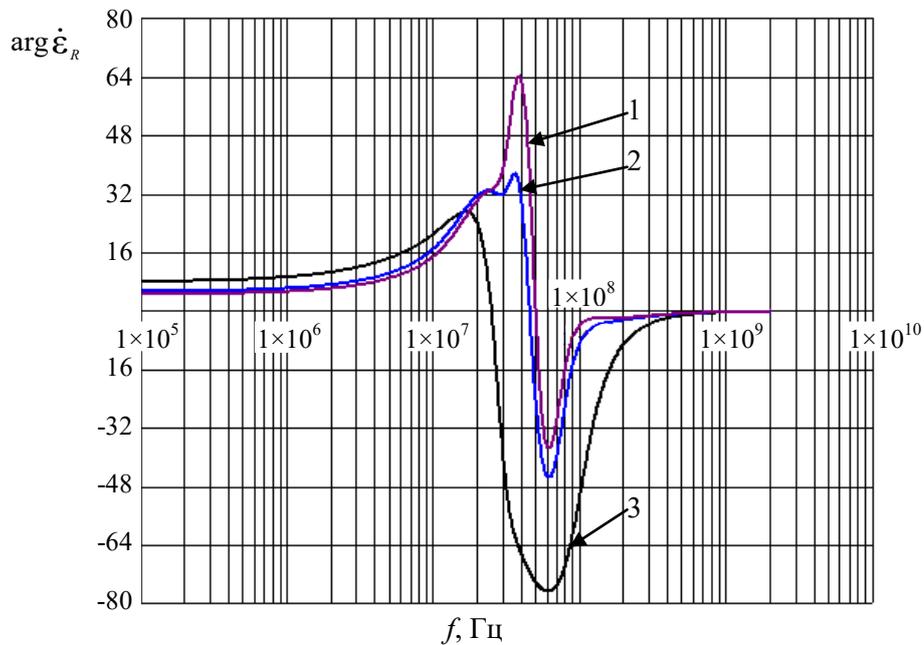
Тензор диэлектрической проницаемости для данного режима взаимодействия приведен в (1). Частотные зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_R$ и $\text{Re} \dot{\epsilon}_L$ при изменении индекса угловой модуляции приведены на рисунках 2, 4.

Приведенные зависимости показывают, что увеличение индекса модуляции приводит к незначительному увеличению частоты циклотронного электронного резонанса и резкому уменьшению частоты плазменного резонанса, представленного на рисунке 3. Это же характерно и для $\dot{\epsilon}_R$ (рисунок 5).



1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 1$; 3 – $\beta = 5$

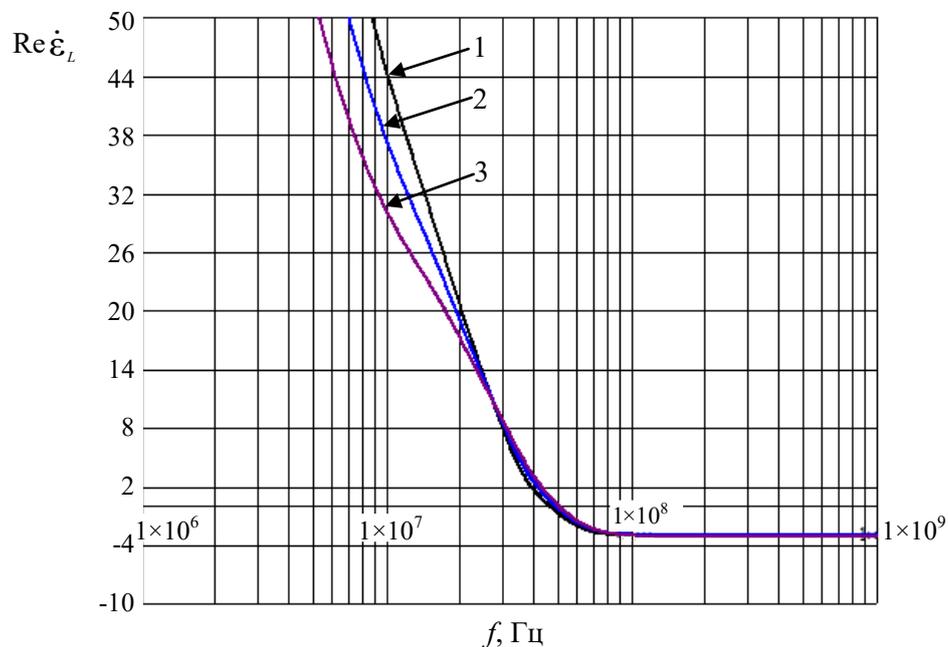
Рисунок 2 – Зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$



1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 1$; 3 – $\beta = 5$

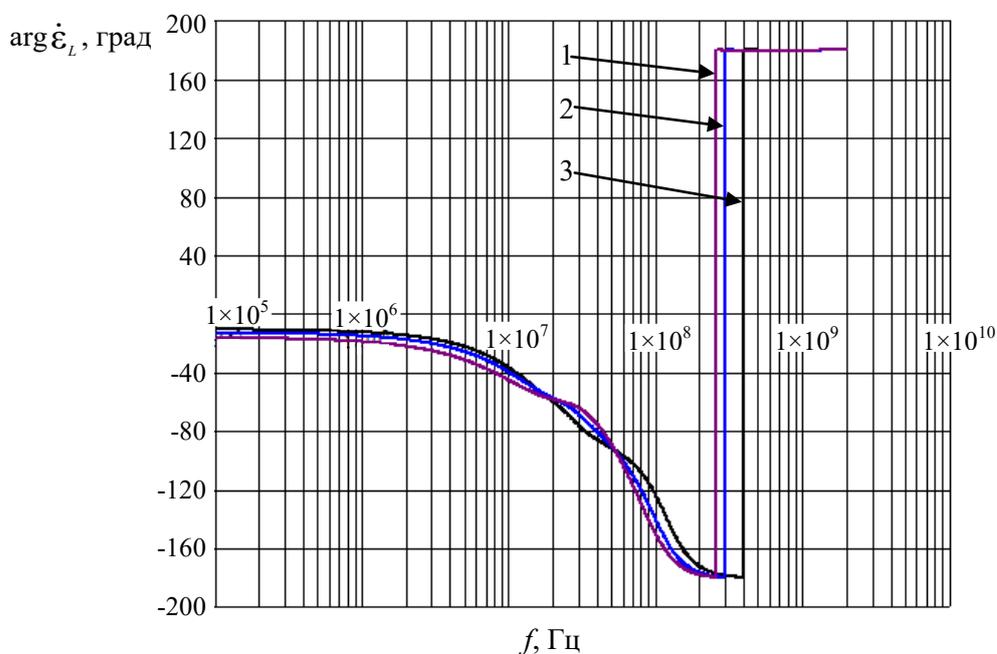
Рисунок 3 – Зависимости $\text{arg} \dot{\epsilon}_R = \varphi(f)$

Характер фазочастотных характеристик $\dot{\epsilon}_R$ и $\dot{\epsilon}_I$ для различных β не изменяется (рисунки 4, 5). При этом с ростом индекса модуляции частота, на которой $\arg \epsilon_R = 0$, соответствующая ВЧ-резонансу, уменьшается.



1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 1$; 3 – $\beta = 5$

Рисунок 4 – Зависимости $\text{Re} \dot{\epsilon}_L = \varphi(f)$



1 – $\beta = 0,5$; 2 – $\beta = 1$; 3 – $\beta = 5$

Рисунок 5 – Зависимости $\arg \dot{\epsilon}_L = \varphi(f)$

Проведем анализ зависимостей КЭ тензора от индекса ЧМ β на частоте несущей $f_2 = 500$ МГц, которая соответствует электронному плазменному резонансу. Вели-

чина $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$ уменьшается по линейному закону от значения 7,4 при $\beta = 0$ до нуля при $\beta \approx 27$. Аналогичная зависимость наблюдается при $\beta = 43 \dots 100$, где величина $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$ уменьшается от нуля до -18 . При значениях индекса ЧМ $\beta = 27 \dots 43$ происходит изменение знака $\text{Re}\dot{\epsilon}_R$ и имеются три точки перехода этой величины через нуль: для $\beta_1 \approx 25$, $\beta_2 \approx 35$ и $\beta_3 \approx 43$. Фазочастотная характеристика $\text{arg}\dot{\epsilon}_R$ уменьшается от -10^0 при $\beta = 0$ до -128^0 для $\beta = 30^0$, затем происходит увеличение $\text{arg}\dot{\epsilon}_R$ до -90^0 при $\beta = 40^0$. Для значений индекса ЧМ $\beta = 40-60^0$ происходит резкое уменьшение фазы от -90^0 до -205^0 , и с дальнейшим ростом β наблюдается незначительное изменение $\text{arg}\dot{\epsilon}_R$.

Зависимости $\text{Re}\dot{\epsilon}_L = \varphi(\beta)$ и $\text{arg}\dot{\epsilon}_L = \varphi(\beta)$ имеют такой же вид, как и $\text{Re}\dot{\epsilon}_R = \varphi(\beta)$ и $\text{arg}\dot{\epsilon}_R = \varphi(\beta)$.

Таким образом, использование ЧМ на частоте несущей $f_2 = 1$ ГГц с индексом $\beta = 25-43$ может быть применено для разработки электромагнитных методов поиска углеводородов [3, 4, 6, 7].

В таблице представлены расчетные значения частот, при которых $\text{Re}\dot{\epsilon}_R = 0$ для случая ЧМ-сигналов.

Таблица – Расчетные значения частот $f_{Ц}$, $f_{П}$ для ЧМ-сигналов

F_1 , МГц	β	$f_{Ц}$, Гц	$f_{П}$, Гц
20	0,1	3.59732E+6	1.56879E+8
	0,5	2.07592E+6	7.42368E+7
	1	5.93758E+6	5.79863E+7
	10	13.46837E+6	3.74962E+7
	100	4.75298E+6	9.57289E+6
100	0,1	3.24962E+6	2.95741E+8
	0,5	3.96347E+6	1.54981E+8
	1	1.02365E+7	1.37452E+8
	10	10.27823E+7	1.31287E+8
	100	3.04792E+6	1.18716E+8

Результаты и их обсуждение

Из результатов исследования видно, что при индексах ЧМ $\beta = 0,1 \dots 10$ частота резонансного взаимодействия $f_{Ц}$ увеличивается, а при $\beta = 100 \dots 1000$ происходит ее уменьшение. При увеличении β происходит уменьшение частоты $f_{П}$, за исключением значения $\beta = 10^2$ при частоте модуляции $F_1 = 20$ МГц, где происходит увеличение частот плазменного резонанса.

Заключение

В режиме воздействия АМ-сигнала на АС с учетом формул Дебая появляется дополнительная мнимая составляющая, зависящая от параметров АМ-сигнала.

ЧМ-сигнал оказывает существенное влияние на физические процессы в среде над углеводородными залежами. Проявляется это в модуляции проницаемости вещественной части диагональных компонентов тензора и является сложной функцией от час-

точной составляющей, что позволяет вести разработку методов поиска и обнаружения залежей углеводородов с дополнительной точностью.

Список использованных источников

1. Янушкевич, В.Ф. Моделирование двухчастотного взаимодействия электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – 1999. – № 10. – С. 27-29.
2. Тархов, А.Г. Поиски и разведка полезных ископаемых и геологическое картирование радиоволновым методом (радиокип) / А.Г. Тархов. – М.: ВИЭМС, 1965. – С. 21-35.
3. King, R.W. Zaferral Electromagnetic Waves from a horizontal antenna for remote sensing in the ocean / R.W. King // IEEE Trans Ant. And Prop. – 1989. – V. 37, № 10. – P. 1250-1255.
4. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 98-101.
5. Гололобов, Д.В. Поиск месторождений углеводородов радиоволновым методом / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Приборы. Справочный журнал. – 1999. – № 10. – С. 25-27.
6. Савченко, В.Н. Электромагнитное поле пульсирующего подводного источника / В.Н. Савченко, В.П. Смагин // Тез. докл. XXXII Всес. НТК. – Владивосток, 1990. – Т. 1, Ч. II. – С. 80-82.
7. Гололобов, Д.В. Аналитическое и экспериментальное исследование взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев, Ю.Н. Стадник // Геология нефти и газа. – 1995. – № 3. – С. 26-30.

Kalintsev S.V., Kremenya K.I., Yanushkevich V.F.

Using an electromagnetic methods to search hydrocarbon deposits

The article proves a significant effect of frequency-modulated signal on the physical processes in the environment of a hydrocarbon reservoir. This is manifested in the modulation of the permeability of the real part of the diagonal components of the tensor, and is a complex function of the frequency component that allows for the development of methods to search for and discovery of hydrocarbon deposits with more precision.

There are stated the research results of interaction of amplitude-modulated signals having various parameters with hydrocarbon deposits.

Поступила в редакцию 29.01.2015 г.

УДК 622.363.2.001.57

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ УЧАСТКОВ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ

Шпургалов Ю.А., Гец А.К., Бокшиц В.Н. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье предложен способ оптимизации параметров отработки участков шахтных полей с использованием модели их горно-геологических характеристик применительно к условиям Старобинского месторождения калийных солей. Данный способ применен (апробирован) для обоснования выбора лучших (квазиоптимальных) параметров технологической схемы отработки Второго калийного горизонта Третьего рудоуправления.

Введение

Из всех проблем, с которыми сталкивается современная калийная промышленность Республики Беларусь, отметим следующие. Необходимость обрабатывать участки шахтных полей с более низким содержанием полезного компонента, повышающиеся требования к природоохранным мероприятиям, рост цен на энергоресурсы и добычное оборудование, конкуренция на мировом рынке калийных удобрений. Все это накладывает жесткие требования на выбор параметров технологии отработки участков шахтных полей Старобинского месторождения. Поэтому оптимизация параметров отработки участков шахтных полей является актуальной научной задачей.

Результаты исследования

В данной работе разработан алгоритм, который применен для обоснования выбора лучших (квазиоптимальных) параметров отработки участка шахтного поля Второго калийного горизонта Третьего рудоуправления. Разработанный алгоритм представляет собой усовершенствованный метод вариантов, отличающийся от известных подходов следующим. Изначально по определенному алгоритму формируется множество возможных вариантов отработки участка шахтного поля. Затем формализуется экономико-математическая модель оптимизации параметров технологии обрабатываемого участка. На следующем этапе из множества возможных вариантов исключается подмножество вариантов, которые по разным признакам (в том числе и по результатам реального или интуитивного моделирования) не могут быть отнесены к оптимальным. После этого каждый вариант из подмножества оставшихся вариантов проверяется на соответствие формализованной экономико-математической модели, содержащей целевую функцию и ограничения. Из всех вариантов выбирается тот, у которого значение целевой функции имеет экстремальное значение. Возможно использование и многокритериальных экономико-математических моделей [1].

С помощью разработанного способа получены квазиоптимальные параметры технологической схемы, с помощью которой рекомендуется обработать исследуемый участок шахтного поля Второго калийного горизонта Третьего рудоуправления. Целевая функция формализованной экономико-математической модели оптимизационной задачи представляет собой алгебраическую сумму затрат на проведение и крепление подготовительных выработок, амортизационные отчисления на оборудование, электро-

энергию, расходные материалы и фонд оплаты труда. Результаты исследований представлены в таблице.

Таблица – Техничко-экономические показатели отработки участка селективной и слоевой лавами

Вид выемки сильвинитовых слоев	Селективная	Слоевая
Затраты на проведение и крепление выработок		
Длина лавы, м	250	250
Длина столба лавы, м	2250	2250
Длина сбойки, м	350	350
Количество сбоек, шт.	20	20
Суммарная длина выработок, м	19000	19000
Затраты на проведение и крепление 1 м, руб.	455000	455000
Затраты на проведение и крепление, руб.	8 645 000 000,00	8 645 000 000,00
Затраты на амортизационные отчисления		
Нагрузка на очистной забой, тыс. т	3080	3080
Плотность породы, т/м ³	2,1	2,1
Ширина захвата, м	0,8	0,8
Мощность вынимаемого пласта, м	2,94	0,93
Количество циклов в сутки	3,00	7,00
Срок отработки панели, лет	4,17	1,79
Стоимость оборудования, руб.	76 761 550 000,00	140 346 800 000,00
Норма амортизации, %	0,22	0,22
Затраты на амортизационные отчисления, руб.	70 364 754 166,67	55 136 242 857,14
Затраты на заработную плату		
Число рабочих, чел.	19	26
З/п в месяц, руб.	9 323 657,00	9 323 657,00
Затраты на з/п, руб.	8 857 474 150,00	5 194 608 900,00
Затраты на электроэнергию		
Фактическая потребляемая мощность, кВт	1 285,8	1 765,8
Годовой расход электроэнергии, кВт·ч	6 943 320	9 535 320
Затраты на электроэнергию, руб.	1 671 540,00	983 802,86
Затраты на расходные материалы		
Уд. затраты расходных материалов на 1 т	712,605	712,605
Вынимаемая горная масса в панели, т	3 087 000,00	3 087 000,00
Затраты на расходные материалы, руб.	2 199 812 403,12	2 199 812 403,12
Суммарные затраты		
Затраты за весь срок отработки панели, руб.	90 068 712 259,79	71 176 647 963,12
Отношение затрат	1,27	

Показано, что для определенных участков шахтного поля Второго горизонта Третьего рудоуправления применение столбовой системы разработки со слоевой выемкой сильвинита (низкие лавы) обеспечивает лучшие технико-экономические показатели, нежели применение столбовой селективной системы с использованием современных селективных комплексов. Этот вывод, в определенном смысле, противоречит распространенному мнению о том, что современные селективные комплексы предпочтительнее, отчасти устаревших, низких лав. Полученный нами вывод имеет объяснение, состоящее в том, что низкие лавы имеют меньшее количество оборудования и, соответственно, более низкие амортизационные отчисления, меньшие затраты на электроэнергию. Кроме того, низкие лавы имеют относительно более высокую скорость подвигания забоя и, следовательно, отработка панели осуществляется за меньший срок.

На рисунке представлен интерфейс компьютерной модели «Геология».

The screenshot displays the 'Геология' software interface, which is used for calculating geological indicators. It is divided into several sections:

- Третье рудоуправление ПО "Белорусский":** The main menu includes options for 'Настройка' (Settings), 'Точка' (Point), 'Линия' (Line), 'Площадь' (Area), and 'Выход' (Exit). A sub-menu for 'Рудник' (Mine) is open, showing 'Первый' (First), 'Второй' (Second), 'Третий' (Third), and 'Четвертый' (Fourth) horizons.
- Второй горизонт:** The second menu level, where 'Второй' (Second) and 'Третий' (Third) horizons are selected.
- Расчет геологической информации в точке:** The third menu level, where 'Точка' (Point) is selected.
- Расчет геологической колонки в точке X=23000 Y=23000:** The calculation results for 'Рудник 3' (Mine 3) and 'Горизонт 2' (Horizon 2).

Слой	Мощность	КС1	НО
Верхний сильвинитовый	0.93	39.57	5.57
Средний галитовый	0.82	1.83	12.21
Нижний сильвинитовый	1.05	41.30	5.73
Пласт Сильвинитовые слои	2.80	29.17	7.57
	1.98	40.49	5.65
Глубина, м		502.66	
Мощность ВЗТ, м		327.87	
Абсолютная отметка почвы, м		348.55	

Продолжение - <Enter>

Рисунок – Алгоритм расчета горно-геологических показателей участка шахтного поля с использованием компьютерной модели «Геология»

Следует отметить, что преимущество одной технологической схемы над другой определяется горно-геологическими условиями, в которых предполагается их использовать. Поэтому центральным звеном сравнения различных технологических схем отработки участков шахтных полей является моделирование горно-геологических характеристик месторождения. Без использования таких моделей доказательства преимуществ одной технологической схемы над другой будут не достаточно обоснованными. Представленный на рисунке интерфейс компьютерной модели «Геология» поясняет алгоритм моделирования горно-геологических показателей участков шахтных полей применительно для рудников ОАО «Беларуськалий». Концепция построения данной компьютерной модели была разработана одним из авторов настоящей статьи [2].

Требует отдельного исследования наличие тектонических нарушений на территории исследуемого участка и наличие, в таком случае, достаточной мощности водозащитной толщи над разрабатываемым пластом, чтобы исключить возможность прорыва воды в подземные выработки.

Заключение

1. Показан метод моделирования горно-геологических условий и оптимизации параметров добычи, при которых применение столбовых систем разработки со слоевой выемкой сильвинита (низкие лавы) может обеспечить лучшие технико-экономические показатели, чем применение столбовых селективных систем с использованием современных селективных комплексов.

2. Обоснование преимущества низких лав наиболее достоверно обеспечивается за счет использования оптимизационных моделей параметров технологических схем и компьютерных моделей горно-геологических характеристик шахтного поля.

Список использованных источников

1. **Шпургалов, Ю.А.** Компьютерное моделирование принятия решений в производственных задачах: монография / Ю.А. Шпургалов. – Минск: БНТУ, 2009. – 217 с.
2. **Шпургалов, Ю.А.** Информационная математическая модель горно-геологических характеристик пластовых месторождений калийных солей / Ю.А. Шпургалов. – Известия вузов. Геология. – 2004. – № 3. – С. 176-179.

Shpurgalov Ju.A., Gets A.K., Bokshits V.N.

Computer simulation and parameters optimization of the sites mining technology of the mine fields

This article provides a method of optimizing the parameters of the reflection-processing sites of mine fields using the model of their geological characteristics in relation to the conditions of the Starobin potassium salt deposit. This method is used (tested) to justify the selection of the best (quasioptimal) parameters of the technological scheme of the Second mining potash horizon of the Third mine group.

Поступила в редакцию 24.02.2015 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.232.72:629.369.017.2

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА НА ПРИМЕРЕ КИД-220М2****Часть 1. Разработка динамической и математической модели системы привода исполнительного органа комбайна, формирование исходных данных**

Кучик А.С., Михаленя В.Д., Щерба Е.В. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь)

*Данная статья посвящена методике моделирования переходных процессов в трансмиссии исполнительного органа комбайна избирательного действия.***Введение**

Комбайны избирательного действия предназначены для механизации основных процессов проходческого цикла – разрушение горной породы, ее удаление из забоя выработки и погрузка на транспортные средства. Производительность комбайна в большей мере зависит от надежности его узлов, в особенности, от надежности трансмиссионной части исполнительного органа, т.к. исполнительный орган непосредственно контактирует с забоем, а, следовательно, испытывает высокие динамические нагрузки.

При проектировании новой машины большое значение приобретают сроки и качество выполнения проектно-конструкторских работ. Их соответствие современным требованиям можно обеспечить применением новой технологии проектирования, основанной на использовании методов математического моделирования и вычислительной техники.

Моделирование с использованием абстрактной модели обычно связано с меньшими материальными и временными затратами, чем моделирование с использованием физической модели (предметное). Так же, при использовании математической модели в качестве абстрактной модели имеется возможность для автоматизации решения задач функционального проектирования.

Новый технический объект должен превосходить существующие аналоги. Это достигается соответствующей стратегией проектирования, нацеленной на достижение высоких показателей технического уровня и эффективности создаваемого изделия. Решаемые задачи носят оптимизационный характер и требуют разработки и применения новой технологии проектирования.

Исследования нагруженности трансмиссии при переходных процессах становятся практически невозможными без использования методов математического моделирования и применения электронных вычислительных машин.

Исполнительный орган комбайна относится к многомерным динамическим системам, состоящим из множества взаимодействующих между собой и с внешней средой элементов. Математические модели такой системы – модели макроуровня. Объект исследования в модели макроуровня представляется как динамическая система с сосредото-

точными параметрами, описываемая системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Разработка модели макроуровня связана с решением ряда задач:

- разработка динамической модели системы;
- определение параметров элементов модели;
- составление системы дифференциальных уравнений, описывающих состояние элементов динамической модели;
- интегрирование дифференциальных уравнений;
- регрессионный анализ;
- проведение оптимизации.

Разработка динамической модели трансмиссии исполнительного органа

Динамическая модель – это абстрактное графическое отображение основных физических свойств технического объекта и характеристик взаимодействия с внешней средой.

Физические свойства объекта определяются его структурой и параметрами элементов, из которых он состоит. Параметр – это величина, характеризующая свойство или режим работы объекта.

Существует 3 типа параметров:

- внутренние параметры – это параметры элементов, из которых состоит технический объект;
- выходные параметры характеризуют свойство технического объекта в целом;
- внешние параметры – это параметры внешней среды, оказывающие влияние на функционирование технического объекта.

Наиболее часто при построении динамической модели применяется метод сосредоточенных масс.

При построении динамической модели методом сосредоточенных масс выделяют некоторые абстрактные элементы, наделяя их определенными физическими свойствами. Таким образом, выделяют:

- инерционные элементы – это элементы, обладающие инерционными свойствами и способностью накапливать кинетическую энергию;
- упругие элементы отображают упругие свойства динамической системы, они обладают способностью накапливать потенциальную энергию;
- диссипативные элементы отображают свойства рассеивания энергии;
- трансформаторные элементы отображают безынерционные преобразования параметров потока энергии, осуществляемые техническими устройствами, называемыми трансформаторами.

Состояние сосредоточенных масс характеризуется фазовыми координатами типа потока (скорость либо геометрические координаты). Взаимодействие сосредоточенных масс характеризуют фазовыми координатами типа потенциала.

Динамическая модель трансмиссии исполнительного органа формируется на основе сборочного чертежа на данный привод (рисунок 1).

Инерционные элементы:

J_1 – приведенный момент инерции, учитывающий инерционные свойства ротора двигателя и деталей, связанных с ротором;

J_2 – приведенный момент инерции, учитывающий инерционные свойства водила планетарного ряда с сателлитами, подшипниками, ведущей конической шестерней и крепежных деталей;

J_3 – приведенный момент инерции, учитывающий инерционные свойства ведомого конического колеса, вал-шестерни цилиндрической передачи и подшипников;

J_4, J_5 – приведенный момент инерции, учитывающий инерционные свойства выходного вала, ведомого цилиндрического зубчатого колеса, подшипников, крепежных деталей и, непосредственно, режущей коронки с забурником.

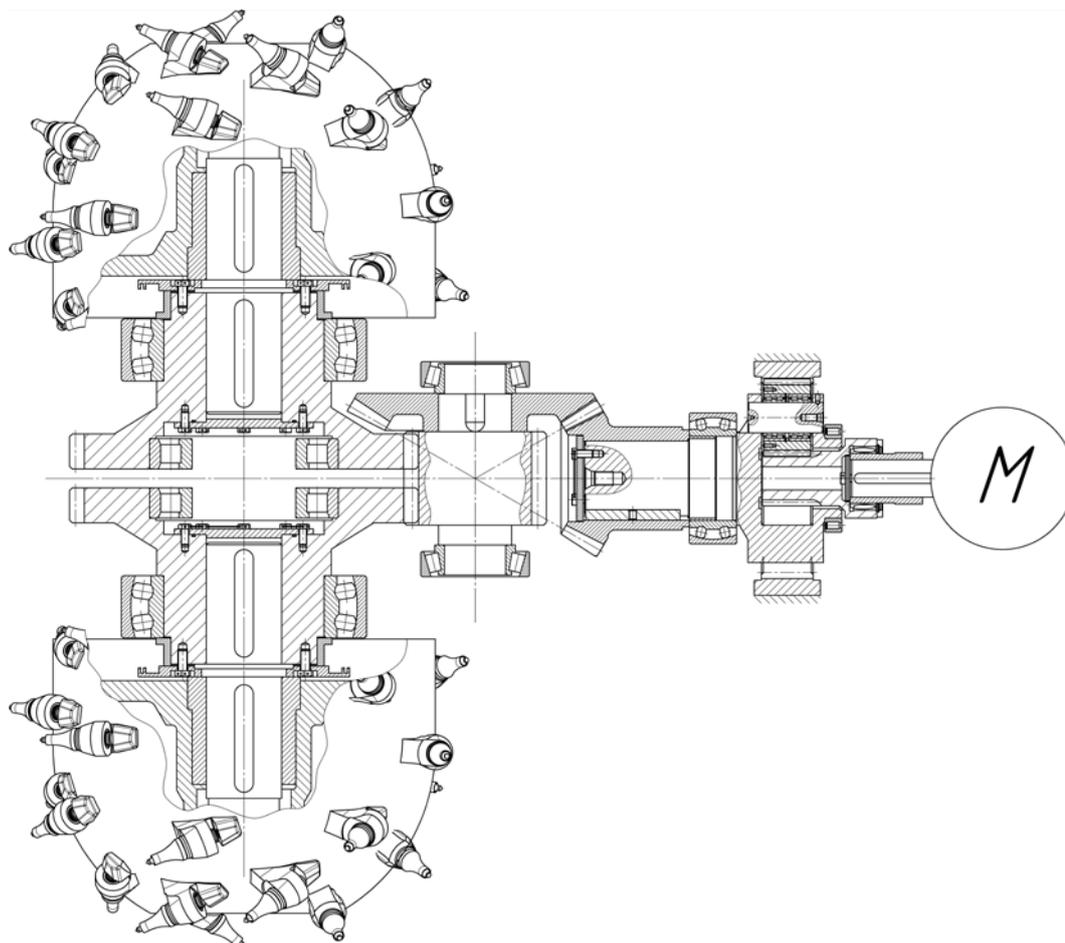


Рисунок 1 – Сборочный чертеж привода исполнительного органа

Упругие элементы:

c_1 – коэффициент жесткости, учитывающий упругие свойства солнечной шестерни, водила планетарного ряда, шпоночных и зубчатых соединений полумуфт, зубьев планетарного ряда;

c_2 – коэффициент жесткости, учитывающий упругие свойства вал-шестерни цилиндрической передачи, зубьев конической передачи, шпоночного соединения вал-ступица;

c_3, c_4 – коэффициенты жесткости, учитывающие упругие свойства выходного вала, зубьев цилиндрического зубчатого колеса, шпоночных соединений.

Диссипативные элементы:

μ_1 – коэффициент сопротивления, учитывающий диссипативные свойства солнечной шестерни, водила планетарного ряда, шпоночных и зубчатых соединений полумуфт, зубьев планетарного ряда;

μ_2 – коэффициент сопротивления, учитывающий диссипативные свойства вал-шестерни цилиндрической передачи, зубьев конической передачи, шпоночного соединения вал-ступица;

μ_3, μ_4 – коэффициенты сопротивления, учитывающие диссипативные свойства выходного вала, зубьев цилиндрического зубчатого колеса, шпоночных соединений.

Трансформаторные элементы:

U_1, η_1 – параметры трансформаторного элемента, характеризующего преобразующие свойства планетарного ряда;

U_2, η_2 – параметры трансформаторного элемента, характеризующего преобразующие свойства конической передачи;

U_3, η_3 – параметры трансформаторного элемента, характеризующего преобразующие свойства цилиндрической передачи.

На динамическую систему исполнительного органа действуют внешние воздействия типа потенциала:

M_1 – внешнее воздействие, соответствующее моменту двигателя;

M_2, M_3 – внешнее воздействие, соответствующее моментам сопротивления резанию.

Динамическая модель трансмиссии исполнительного органа представлена на рисунке 2.

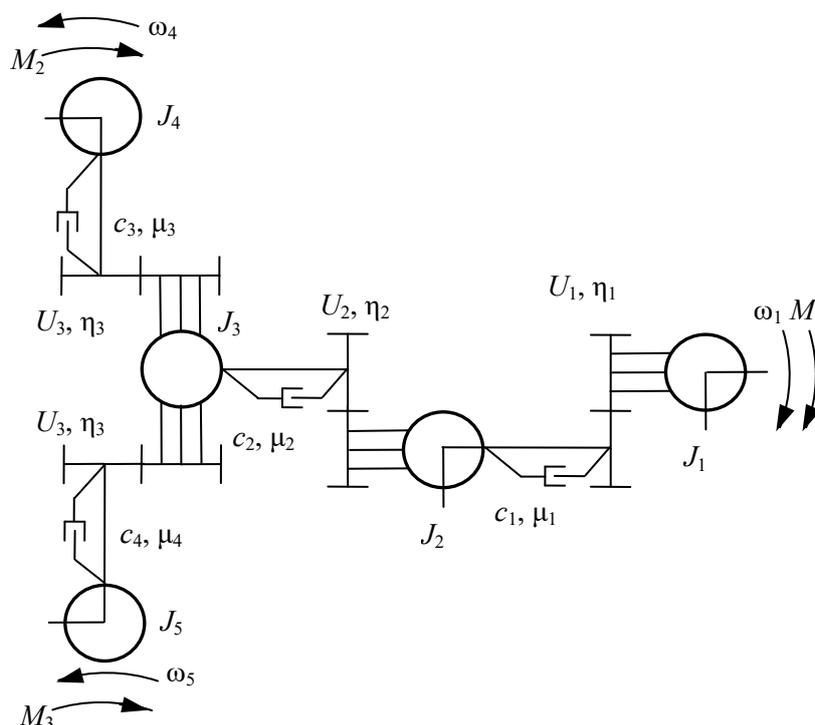


Рисунок 2 – Динамическая модель трансмиссии исполнительного органа

На основании динамической модели структурно-матричным методом, подробно описанном в [1], формируется математическая модель в виде систем компонентных и топологических уравнений (1).

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{M_1 - \frac{(M_{y1} + M_{л1})}{U_1 \cdot \eta_1}}{J_1}; \\
 \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{M_{y1} + M_{л1} - \frac{(M_{y2} + M_{л2})}{U_2 \cdot \eta_2}}{J_2}; \\
 \frac{d\omega_3}{dt} &= \frac{M_{y2} + M_{л2} - \frac{(M_{y3} + M_{л3}) + (M_{y4} + M_{л4})}{U_3 \cdot \eta_3}}{J_3}; \\
 \frac{d\omega_4}{dt} &= \frac{M_{y3} + M_{л3} - M_2}{J_4}; \\
 \frac{d\omega_5}{dt} &= \frac{M_{y4} + M_{л4} - M_3}{J_5}; \\
 \frac{dM_{y1}}{dt} &= c_1 \left(\frac{\omega_1}{U_1} - \omega_2 \right); \\
 \frac{dM_{y2}}{dt} &= c_2 \left(\frac{\omega_2}{U_2} - \omega_3 \right); \\
 \frac{dM_{y3}}{dt} &= c_3 \left(\frac{\omega_3}{U_3} - \omega_4 \right); \\
 \frac{dM_{y4}}{dt} &= c_4 \left(\frac{\omega_3}{U_3} - \omega_5 \right); \\
 M_{л1} &= \mu_1 \left(\frac{\omega_1}{U_1} - \omega_2 \right); \\
 M_{л2} &= \mu_2 \left(\frac{\omega_2}{U_2} - \omega_3 \right); \\
 M_{л3} &= \mu_3 \left(\frac{\omega_3}{U_3} - \omega_4 \right); \\
 M_{л4} &= \mu_4 \left(\frac{\omega_3}{U_3} - \omega_5 \right).
 \end{aligned} \right\} (1)$$

Численные значения моментов инерции валов можно определить по формуле (2) [2].

$$I = \frac{m \cdot r^2}{2}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (2)$$

где m – масса элемента, кг;

r – радиус вала, м.

Формула (2) справедлива для вала, постоянного по диаметру, если же вал ступенчатый, то его надо разбивать на участки и определять момент инерции участков вала, а затем их сложивать. Помимо этого необходимо учитывать моменты инерции зуб-

чатых колес, муфт, колец подшипников и др., посаженных на валы, что вызывает большие временные затраты.

На современном этапе проектирования эскизная компоновка проекта включает в себя трехмерное моделирование узлов. В программных продуктах, позволяющих производить трехмерное моделирование, заложена функция определения моментов инерции деталей и сборочных узлов в целом, что позволяет более точно определять данные параметры. Численные значения параметров инерционных элементов динамической модели приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Численные значения параметров инерционных элементов

Параметр	Значение	Размерность
J_1	2,369	кг·м ²
J_2	3,346	
J_3	4,859	
J_4	118,407	
J_5		

Коэффициенты жесткости для упругих элементов динамической модели определяются согласно методике [2].

Жесткостью участка вала на кручение называют величину скручивающего момента, необходимую для закручивания участка вала длиной 1 м на угол, равный одному радиану:

$$c = \frac{G \cdot I_p}{L}, \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}, \quad (3)$$

где G – модуль упругости материала вала, Н/м²;

I_p – полярный момент инерции сечения вала, м⁴;

L – длина участка вала, м.

Для шпоночного соединения вал-ступица:

$$c_{\text{шп}} = \frac{D^2 \cdot l_c \cdot h}{k_{\text{шп}}}, \quad (4)$$

где D – диаметр вала со шпонкой, м;

l_c – длина шпоночного соединения, м;

h – высота шпонки, м;

$k_{\text{шп}} = 6,4 \cdot 10^{-12}$, м³/Н.

Для шлицевого соединения вал-ступица:

$$c_{\text{шл}} = \frac{d_c^2 \cdot l_c \cdot h_c \cdot z}{k_{\text{шл}}}, \quad (5)$$

где d_c – средний диаметр шлицев, м;

l_c – длина шлицевого соединения, м;

h_c – высота шлица, м;

z – число шлицев;

$k_{\text{шл}} = 4 \cdot 10^{-12}$, м³/Н.

Для зубчатой передачи, приведенной к одному зубчатому колесу:

$$c_{зп} = \frac{b \cdot d^2 \cdot \cos^2 \alpha}{4 \cdot k_3}, \quad (6)$$

где b – ширина зубчатого колеса, м;

d – диаметр колеса на валу, к которому приводят податливость, м;

α – угол зацепления, $\alpha = 20^\circ$;

$k_3 = 6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$.

При последовательном соединении упругих элементов с известными коэффициентами жесткости коэффициент жесткости из закона сохранения потенциальной энергии вычисляется из выражения:

$$c_e = \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \dots + \frac{1}{c_n} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где n – количество последовательных элементов.

Численные значения параметров упругих элементов динамической модели приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Численные значения параметров упругих элементов

Параметр	Значение	Размерность
c_1	$2,508 \cdot 10^6$	$\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$
c_2	$6,183 \cdot 10^6$	
c_3	$6,849 \cdot 10^6$	
c_4		

Коэффициент сопротивления диссипативного элемента зависит от параметров элементов динамической модели, непосредственно к нему примыкающих. При определении коэффициента сопротивления используют парциальные системы с упругим базовым элементом.

Парциальная система – частичная частотная подсистема, выделяемая из динамической системы, имеющая только одну частоту собственных колебаний, называемую собственной парциальной частотой. Особенность структуры парциальной системы – наличие одного базового элемента и некоторого множества взаимодействующих с ним элементов с иными физическими свойствами.

Парциальная система для определения коэффициента сопротивления первого диссипативного элемента представлена на рисунке 3.

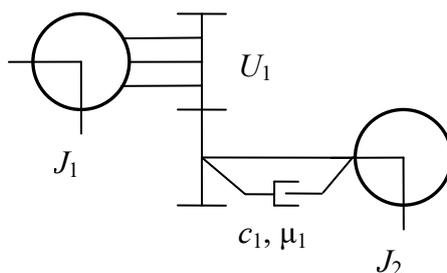


Рисунок 3 – Парциальная система с базовым упругим элементом

Коэффициент сопротивления определяется по формуле:

$$\mu = 2 \cdot \gamma \cdot J' \cdot \sqrt{\frac{c}{J'}}, \quad (8)$$

где γ – относительный коэффициент затухания колебаний, $\gamma = 0,3$;

J' – параметр эквивалентного приведенного инерционного элемента.

Для данной парциальной системы параметр определяется по формуле:

$$J_1' = \frac{J_1 \cdot U_1^2 \cdot J_2}{J_1 \cdot U_1^2 + J_2}. \quad (9)$$

Для остальных парциальных систем модели коэффициент сопротивления определяется аналогично. Численные значения коэффициентов сопротивления математической модели представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Численные значения параметров диссипативных элементов

Параметр	Значение	Размерность
μ_1	1690	$\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$
μ_2	2695	
μ_3	8162	
μ_4		

Выводы

1. На основании сборочного чертежа привода методом сосредоточенных масс сформирована динамическая модель привода.
2. На основании динамической модели структурно-матричным методом была сформирована математическая модель привода.
3. Определены параметры математической модели.

Список использованных источников

1. **Тарасик, В.П.** Математическое моделирование технических систем / В.П. Тарасик. – Минск: Дизайн-ПРО, 2004. – 640 с.
2. **Маслов, Г.С.** Расчеты колебаний валов: справочное пособие / Г.С. Маслов. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.

Kuchik A.S., Mikhalenya V.D., Shcherba Ye.V.

The mathematic modeling for the functional process of the roadheader cutting device for KID-220M2 example.

Part 1. The designing of dynamic and mathematic model for the transmission system of the roadheader cutting device and formation of initial data

This article describes a methodic of the modeling process in transmission of the cutting device of the roadheader.

Поступила в редакцию 17.12.2014 г.

УДК 621.81.004.67(075)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Иванов В.П., Вигерина Т.В., Кастрюк А.П. (УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк, Беларусь)

Обоснована с использованием имитационного моделирования совокупность оптимизированных технических решений на стадии организации производства по восстановлению деталей, обеспечивающих ограничения по качеству и производительности процессов с минимальным расходом производственных ресурсов.

Введение

Долговечность современной техники существенно повысилась за счет использования новых материалов и процессов, а также более совершенного оборудования. Рекламная политика ее изготовителей, требующая загрузки своего производства с получением максимального дохода, нацелена на то, чтобы, спустя определенный срок службы, изготовленная машина была утилизирована или продана в «третьи» страны, а вместо нее приобретена новая машина. Это обусловило практически исключение капитального ремонта полнокомплектных машин и сокращение объемов ремонта агрегатов. Выполняемые ремонты агрегатов предполагают замену изношенных деталей новыми запасными частями без восстановления геометрических параметров корпусных деталей этих агрегатов. В качестве запасных частей производителям техники выгодно поставлять дорогие детали, к тому же, как правило, изготовленные с отступлением от требований технической документации, которые нежелательно использовать при сборке нового изделия. Однако ремонт агрегатов с восстановлением их деталей при полном использовании их остаточной долговечности и обеспечении нормативного послеремонтного ресурса является экономически выгодным. Этому способствует современная организация производства по восстановлению деталей.

Цель работы – обоснование технических решений при организации процессов восстановления деталей, обеспечивающих их нормативное качество с минимальным расходом производственных ресурсов.

Содержание организации производства

Организация производства – система решений, подготавливаемых специалистами и принятыми руководителями, с мероприятиями по их реализации в составе управления предприятием, которая обеспечивает с максимальной рентабельностью ритмичный выпуск продукции нормативного качества с необходимой производительностью, при полном использовании производственной мощности предприятия, с надлежащими условиями безопасного труда, без загрязнения окружающей среды с минимальным расходом производственных ресурсов.

Комплексным показателем эффективности процесса восстановления детали, который состоит из $i = 1, \dots, n$ операций, является его рентабельность R_n , к максимальному значению которой стремятся, организуя производство соответствующим образом

$$P_H = \frac{Ц - P}{Ц} = 1 - \frac{P}{Ц} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [M_i + O_i + 3Ч_i + Э_i + P_i + A_i + (1 + O_{с.с} + O_{ф.з} + O_{о.с}) 3П_i]}{Ц}, \quad (1)$$

где $Ц$ – оптовая цена изделия (доход производства), руб.;

P – расходы, связанные с восстановлением детали, руб.;

i – индекс, обозначающий принадлежность величины к данной операции;

M_i – затраты на материалы, руб.;

O_i – стоимость переработки вредных отходов, руб.;

$3Ч_i$ – стоимость запасных частей, руб.;

$Э_i$ – затраты на энергию, руб.;

P_i – затраты на содержание в исправном состоянии и восстановление ресурса средств ремонта, руб.;

A_i – амортизационные отчисления, руб.;

$O_{с.с}$ – норматив отчислений на социальное страхование (0,35);

$O_{ф.з}$ – норматив отчислений в чрезвычайный налог и фонд занятости населения (0,04);

$O_{о.с}$ – норматив отчислений по обязательному страхованию работников от несчастных случаев (0,003);

$3П_i$ – основная и дополнительная заработная плата рабочего, руб.

Анализ выражения (1) показывает, что его вариативность заключена в числителе дроби, сумма величин которого определяет расход производственных ресурсов и налоги, отнесенные к заработной плате рабочих, (по сути, себестоимость технологического процесса).

Ритмичность производства – его способность выпускать продукцию или оказывать услуги через равные промежутки времени. Это свойство обусловлено его четким планированием, образцовой трудовой и технологической дисциплиной, работой оборудования без отказов и остановок (за счет того, что оно прошло осмотр с планово-предупредительным ремонтом по графику), своевременным обеспечением рабочих мест необходимыми комплектующими изделиями и производственными ресурсами.

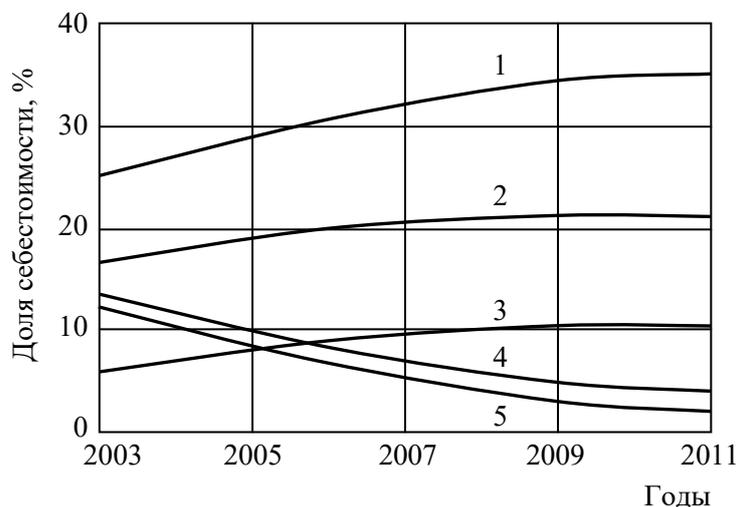
Ограничения – показатели, значения которых должны быть обеспечены неукоснительно. К ним относят геометрические параметры (расположение, форма, размеры и шероховатость поверхностей деталей) и физико-химические характеристики, определяющие работоспособность материала трущихся поверхностей (химический и фазовый состав, дислокационная структура), отсутствие усталостных трещин на поверхностях деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Указанные параметры отвечают за износостойкость, усталостную прочность и жесткость элементов деталей и обеспечивают нормативную долговечность этих деталей.

Технические решения (в виде обоснования используемых материалов, технологических операций, оборудования, приспособлений и инструментов) должны быть пропущены сквозь «сито ограничений», т.е. выделены для целей синтеза только те из них, которые обеспечивают ограничения по качеству и производительности. В процесс включают операции, которые обеспечивают установленные требования к геометрическим параметрам изделий и свойствам их материала, а виды и количество применяемого оборудования – заданную производительность процесса.

Параметры оптимизации – показатели, влияющие на эффективность производства, значения которых стремятся уменьшать. Такими показателями служат расходы различных производственных ресурсов. Остаточная долговечность ремонтного фонда

деталей – тоже производственный ресурс, который сегодня не учитывают, и который ничего не стоит, хотя это неправомерно.

Составляющие себестоимости. Наибольшая часть себестоимости ремонта агрегатов приходится на материалы и запасные части, а меньшая часть – на энергию и заработную плату (рисунок 1).



1 – запасные части; 2 – сырье и материалы; 3 – заработная плата (основная и дополнительная с отчислениями в фонд социальной защиты); 4 – амортизационные отчисления; 5 – топливо и энергия

Рисунок 1 – Динамика изменения структуры себестоимости ремонта автотракторных двигателей за 2003-2011 годы

Более ранние исследования [1] показывают, что доли себестоимости следующие: запасные части – 45,7-48,9 %, полуфабрикаты и материалы – 15,5-16,0 %, тепловая и электрическая энергия – 12,8-14,2 %, составляющая до 60 % общепроизводственных расходов, заработная плата – 6,5-8,3 %. В течение исследуемого периода (2003-2011 годы) и до настоящего времени наблюдался рост долей себестоимости ремонтируемой продукции, относящихся к полуфабрикатам и материалам, запасным частям и заработной плате. За это время уменьшались доли себестоимости, приходящиеся на амортизационные отчисления, топливо и энергию. Наиболее интенсивно росли затраты на запасные части. Рост заработной платы был незначительным. Существенно снизились затраты на энергию и амортизационные отчисления. Увеличение затрат на запасные части связано с повышением их цены и уменьшением объемов восстановления деталей. Уменьшение доли себестоимости на топливо и энергию, несмотря на увеличение удельной стоимости ресурсов, объясняется уменьшением объема очистки агрегатов и деталей и нанесения восстановительных покрытий. Уменьшение амортизационных отчислений – результат уменьшения ввода в эксплуатацию нового оборудования, хотя действующее оборудование на 80-90 % используется за пределами амортизационных сроков службы.

Система организационных решений подготавливалась с помощью имитационного моделирования [2] в виде виртуального дискретного описания процесса восстановления деталей во времени. Это позволило с большой адекватностью описать процесс при невозможности проведения соответствующего натурного эксперимента. Схема технологического маршрута восстановления деталей в общем виде представлена на рисунке 2. По схеме технологического маршрута восстановления деталей с использо-

ванием имитационного моделирования и элементов оптимизации может быть выбран технологический процесс, подходящий для конкретных производственных условий.

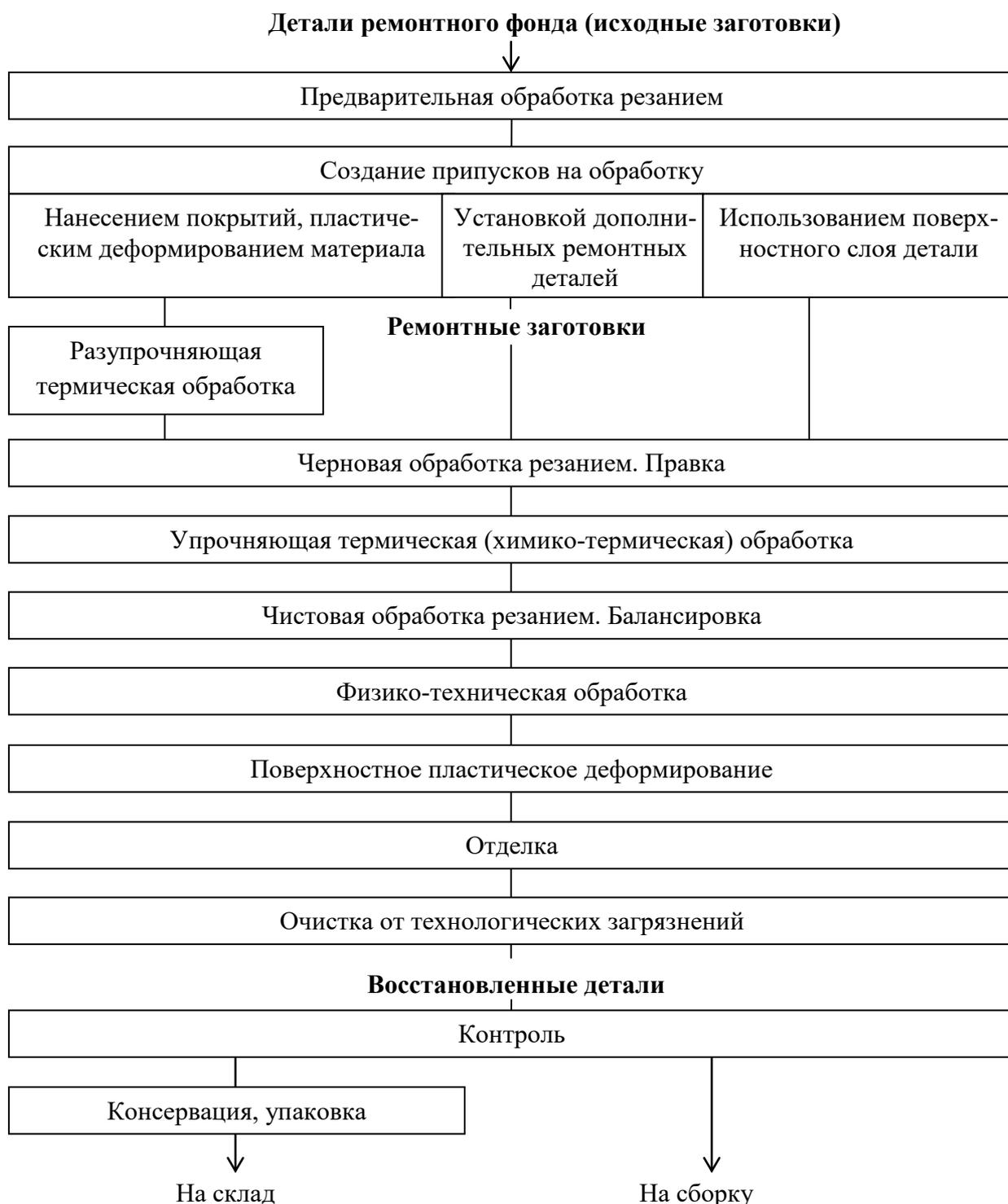


Рисунок 2 – Схема технологического маршрута восстановления деталей

В результате моделирования впервые рассмотрены все следующие друг за другом в течение всего жизненного цикла детали процессы ее восстановления при использовании в одном агрегате (необезличенный метод) или в разных агрегатах (обезличен-

ный метод). Это позволяет более полно использовать остаточную долговечность деталей как одного из основных видов ресурсов ремонтного производства.

Оптимизация технических решений на графах (рисунок 3) заключалась в следующем [3]: в каком бы состоянии не находилась производственная система в результате определенного числа шагов, последующее управление на ближайшем шаге выбирают таким образом, чтобы оно в совокупности с оптимальным управлением на всех последующих шагах приводило к минимальному расходу ресурсов (в стоимостном выражении):

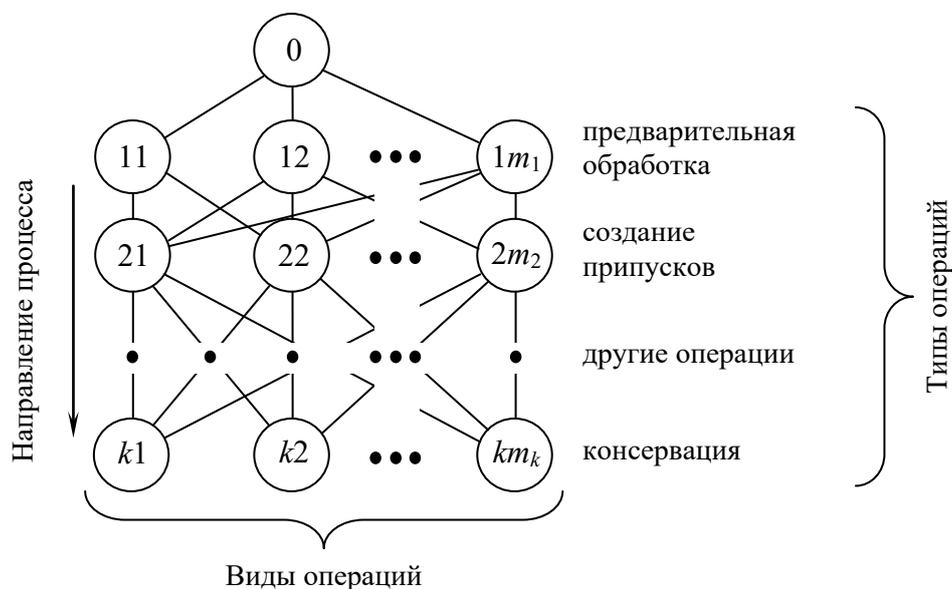
$$P_{c_{i+1}} = \min (\text{по всем вершинам графа}) [P_{c_i} + P_{c_{(i+1)-1}}], \quad (2)$$

где i – операции процесса;

$P_{c_{i+1}}$ – расход ресурсов при выполнении $i+1$ операций;

P_{c_i} – расход ресурсов при выполнении i операций при условии, что соответствующая часть процесса выбрана оптимальным образом;

$P_{c_{(i+1)-1}}$ – расход ресурсов при выполнении $(i+1)$ -ой операции процесса.



1, 2, ..., k – типы операций; m_1, m_2, \dots, m_k – количество видов операций каждого типа

Рисунок 3 – Граф вариантов технологического процесса восстановления детали

Шаг варьирования составлял переход во времени к очередной технологической операции.

Результаты и обсуждение. Моделирование организации процессов восстановления деталей и их оптимизация послужили обоснованием следующих технических решений.

Ряд деталей (валы, гильзы, поршни и др.), входящих в трущиеся соединения, имеют на момент восстановления небольшие износы (несколько сотых миллиметра). На их шейки, отверстия и плоскостные элементы предусмотрены ремонтные размеры, которые достигаются обработкой резанием. В этом случае ремонтные заготовки получают из исходных заготовок без нанесения или силового перемещения материала между элементами заготовки. С точки зрения экономичности процесса восстановления должны быть использованы все предусмотренные ремонтные размеры заготовок за

счет обеспечения производства сопрягаемыми деталями всех ремонтных размеров (например, вкладышами коленчатого вала, поршнями и др.), правки длинных деталей типа валов перед обработкой, равномерного снятия припуска при обработке резанием за счет оптимального базирования, исключения субъективного фактора.

В ряде публикаций высказывается мнение о нецелесообразности и даже вреде правки деталей типа «вал». Каково бы не было отношение к ней (в том числе и негативное), правка применялась и применяется как в ремонтном производстве, так и на машиностроительных предприятиях с использованием импортного оборудования. Одной лишь обработкой резанием не удастся достичь нормативного расположения поверхностей по причине наличия внутренних остаточных напряжений в материале детали и неуправляемого их перераспределения после снятия слоев материала на операциях обработки резанием. Требуется лишь дополнять операцию правки «щадящими» мероприятиями, например, термическим фиксированием ее результатов или всесторонним сжатием деформируемых элементов.

Число капитальных ремонтов агрегатов вместе с восстановлением базовых и основных деталей необходимо ограничить двумя за весь их срок службы. Вероятность обработки коренных шеек коленчатого вала под очередной ремонтный размер (без пропуска ремонтного размера) близка к единице. Значение одноименного показателя при обработке шатунных шеек составляет 0,21 [4]. Если увеличить ремонтный интервал шеек с 0,25 до 0,50 мм, то это позволит уверенно вести обработку шеек под очередной ремонтный размер. Количество ремонтных размеров шеек валов избыточно, их максимальное число вполне можно ограничить двумя, что снизит нагрузку на моторные заводы по изготовлению вкладышей коленчатого вала большой номенклатуры.

Уменьшение длины вала при каждой наплавке (рисунок 4) с сопутствующим уменьшением предела его выносливости обуславливает ограничение числа наплавки до одной за весь жизненный цикл детали. Целесообразность мероприятия коррелируется с требованием использования всех предусмотренных ремонтных размеров.

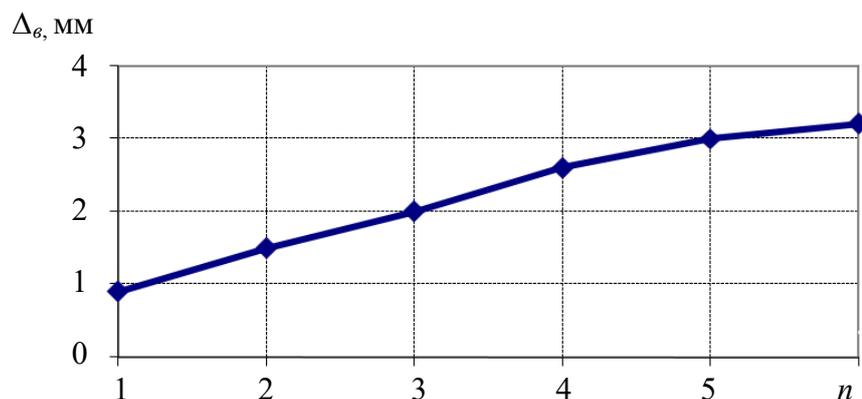
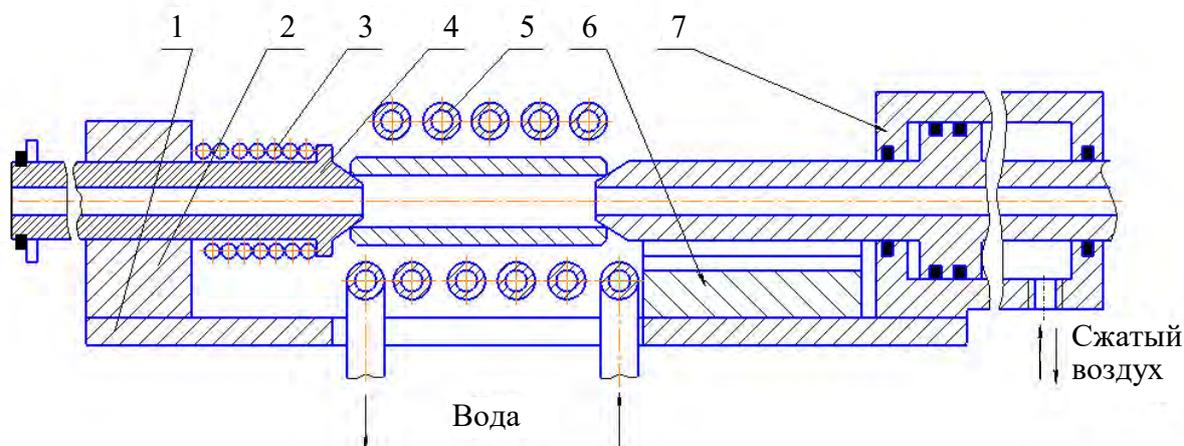


Рисунок 4 – Среднее уменьшение длины коленчатых валов Δ_6 от числа наплавки n

Нанесение покрытий при восстановлении трущихся поверхностей деталей связано с образованием на этих поверхностях материала нового химического, структурного и фазового состава, отличного от материала основы. Это открывает перспективы существенного повышения износостойкости восстановленных поверхностей различных деталей за счет насыщения поверхностного слоя легирующими элементами (углеродом, азотом, бором или их сочетанием), образования упрочняющей фазы и последующими закалкой и отпуском. При этом состав исходного материала покрытия согласуют с со-

ставом упрочняющей фазы, которая образуется позже. Физико-техническая обработка в виде лазерной и электронно-лучевой обработки способствует формированию такой фазы.

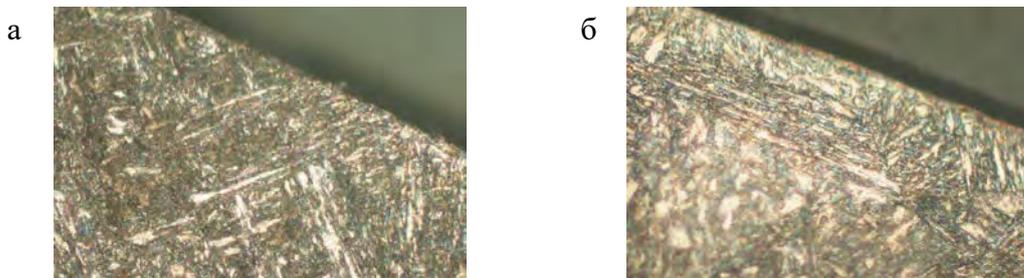
Объемное пластическое деформирование материала в виде термопластических раздачи или обжатия как способа получения ремонтных заготовок с припусками под обработку обеспечивает большую эффективность восстановления наружных и внутренних поверхностей деталей типа «тела вращения с отверстиями» (рисунок 5). При восстановлении шеек валов объемное пластическое деформирование неприменимо. Процесс протекает без расхода дорогих дополнительных материалов, поэтому он эффективен. Широкое его применение в производстве требует исследований стабильности восстанавливаемых размеров при эксплуатации детали и влияния режимов процесса на строение поверхностного слоя и его износостойкость.



1 – плита; 2 – кронштейн; 3 – пружина; 4 – шток полый; 5 – индуктор;
6 – призма направляющая; 7 – пневмоцилиндр

Рисунок 5 – Схема станка для термопластической раздачи поршневых пальцев

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) упрочняет материал наплавленных покрытий, поэтому не следует стремиться к высокой исходной поверхностной твердости их материала. Нормативные значения износостойкости и усталостной прочности восстановленных шеек валов обеспечивает ферритно-мартенситная структура покрытия с мелкодисперсными включениями карбидов или нитридов металлов и преимущественной ориентацией структурных составляющих в радиальном направлении (рисунок 6) под влиянием теплоотвода.



а – без ППД; б – с последующим ППД

Рисунок 6 – Поверхностные слои наплавленных образцов. ×500

В последующем деформирующее усилие ориентирует оси волокон тангенциально вдоль поверхности трения в направлении относительного скольжения, что препятствует росту усталостных радиально ориентированных трещин и обеспечивает интенсивность изнашивания на 10-15 % меньше по сравнению с параметром новых валов. Установлено, что усталостные трещины зарождаются в переходной зоне между материалом покрытия и детали, а уменьшение этой зоны с 65-70 до 10-15 мкм повышает предел выносливости шеек в 1,4-1,5 раза [5].

Малая толщина покрытий, наносимых из дорогих высокотвердых износостойких материалов наплавкой, напылением и электролизом, с припуском на обработку меньшим, чем припуск на обработку заготовок машиностроения, требует применения абразивной обработки (для отверстий – хонингования).

Уточнено распределение задач между различными частями обработки резанием ремонтных заготовок. При черновой механической обработке снимают основную часть операционного припуска. Если условно разделить ее на две части, то вначале обеспечивают нужное взаимное расположение поверхностей детали, а затем – форму ее геометрических элементов.

Параметры расположения поверхностей детали обеспечивают ее базированием (ориентированием относительно движения подачи), при этом вначале добиваются точности углового расположения поверхностей, а затем – точности расстояний. Это объясняется тем, что точность относительного поворота поверхностей обеспечивают методами взаимозаменяемости, что практически исключает возможность последующей коррекции, а точность расстояний – методами регулирования, при котором возможна компенсация отклонений. Взаимное расположение поверхностей заготовки может быть восстановлено и пластическим деформированием ее материала путем правки. Форму геометрических элементов обеспечивают ориентированием заготовки относительно направления главного движения, прямолинейностью направляющих станка и его жесткостью.

В результате чистовой обработки резанием достигают заданную точность размеров и шероховатость поверхностей, близкую к нормативной. Чистовая обработка резанием шеек валов в большинстве случаев абразивная обработка, а для отверстий – тонкое растачивание и хонингование. На отделочных операциях (полирования, суперфиниширования, хонингования) снимается разупрочненный в результате предыдущей обработки резанием слой и обеспечивается требуемая шероховатость поверхностей.

Выводы

Восстановление деталей как основной источник эффективности ремонта машин должно обеспечить достижение нормативной послеремонтной наработки при минимальном расходе производственных ресурсов на свою организацию. Для этого должны быть использованы без пропусков все предусмотренные технической документацией ремонтные размеры заготовок. Целесообразно увеличить ремонтные интервалы шеек валов и отверстий гильз в два раза с целью выполнения размеров следующего ремонтного размера. Число наплавки шеек валов следует ограничить до одной за весь жизненный цикл детали. При выполнении такой наплавки, когда кардинально изменяется состав материала поверхности, важно подобрать такой состав исходного материала, чтобы можно было насытить поверхностный слой легирующими элементами (углеродом, азотом, бором или их сочетанием) для повышения износостойкости восстановленных поверхностей. Необходимо расширить область применения объемного пластического деформирования материала в виде термопластических раздачи или обжатия как спосо-

ба получения ремонтной заготовки с припуском под обработку. Уточнено распределение задач между различными частями обработки резанием ремонтных заготовок с акцентом на обеспечение нормативных значений параметров расположения поверхностей и осей.

Список использованных источников

1. **Иванов, В.П.** Основные направления ресурсосбережения в ремонтном производстве / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Техническое обслуживание, ремонт: труды ГОСНИТИ / ГОСНИТИ. – М., 2013. – Том 112, Ч. 2. – С. 15-18.
2. **Селиванов, С.Г.** Имитационное моделирование процессов постановки новой продукции на производство / С.Г. Селиванов, М.К. Аристархова, К.С. Селиванов. – Уфа: УГАТУ, 1998. – 60 с.
3. **Беллман, Р.** Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.
4. **Иванов, В.П.** Обоснование доли годных деталей ремонтного фонда, годных для дальнейшего применения без ремонтных воздействий / В.П. Иванов, А.П. Кастрюк // Агропанорама. – 2013. – № 5. – С. 38-44.
5. **Кастрюк, А.П.** Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей: научное издание / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополюк: УО «ПГУ», 2012. – 199 с.

Ivanov V.P., Vigerina T.V., Kastruk A.P.

Simulation modeling of organization of parts reconditioning

With the usage of simulation modeling it is proved a complex of the optimized technical decisions on the stage of organization of production for the parts reconditioning ensuring limitations according to quality and process performance with minimum consumption of productive resources.

Поступила в редакцию 04.12.2014 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 678.03.028(047.1)(476)

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ
ВЯЖУЩИХ И ПОЛИМЕРНЫХ ДОБАВОК**

Коломиец А.В., Неверов А.С. (УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель, Беларусь), Власенко Д.А. (ООО «Стандарт-Э.С.Т.», г. Гомель, Беларусь)

В статье рассмотрена проблема совместимости водонерастворимых полимеров с водными растворами минеральных вяжущих. Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на оптимизацию состава композиционного материала и способа его получения. Рассмотрены вопросы влияния состава, строения и способов получения композиционного материала на его эксплуатационные свойства.

Введение

Обладая рядом положительных свойств (сравнительно небольшая объемная масса, огнестойкость, хорошая звукоизоляция), изделия из гипса и гипсобетона имеют и существенные недостатки (недостаточная водостойкость, сравнительно низкая прочность, ползучесть под нагрузкой, особенно при повышенной влажности), поэтому они в основном применяются в ненесущих и малонагруженных конструкциях, защищенных от влаги [1-3]. Применение полимерных добавок, сохраняя положительные свойства гипсовых материалов, позволяет повысить их водостойкость, стойкость к агрессивным средам, тепло- и электроизоляционные свойства, улучшить ряд физико-механических свойств (уменьшить или даже полностью исключить хрупкость, повысить адгезию к металлам и другим материалам). В этом отношении наиболее предпочтительными по совокупности своих свойств и доступности являются такие крупнотоннажно выпускаемые промышленностью полимеры как полиэтилен и другие термопласты конструкционного назначения. Однако применение их в композиционных материалах на основе гипсовых вяжущих сдерживается плохой совместимостью с водой, используемой для затворения гипса.

**Исследование совместимости гипса с водонерастворимыми полимерами
и оптимизация состава гипсополимерных образцов**

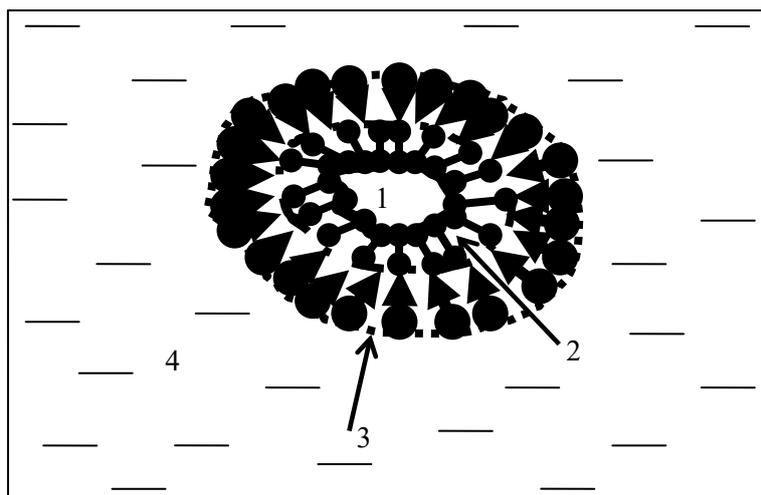
Так же как и другие минеральные вяжущие гипс хорошо совмещается с водонерастворимыми полимерами фенольными, карбамидными, эпоксидными и др., способными в твердеющем цементном камне переходить в твердое нерастворимое состояние под воздействием нагревания или щелочной среды, возникающей при гидратации цемента, или специально вводимых добавок – отвердителей [4]. Однако такие гипсополимерные системы неустойчивы к воде и водным растворам. Присутствие в твердеющей системе водонерастворимых органических веществ замедляет твердение вяжущего. Поэтому при твердении во влажных условиях такие материалы медленнее набирают прочность, чем материалы на основе одного минерального вяжущего. Кроме того, влажные условия препятствуют процессу пленкообразования из полимерной дисперсии, т.е. замедляется

формирование структуры полимерного связующего [5]. Аналогичные недостатки присущи подобным материалам на водных дисперсиях полимеров. Кроме того, такие системы термодинамически неустойчивы, склонны к коагуляции, поэтому при получении таких дисперсий в их состав вводится большое количество стабилизаторов – поверхностно-активных веществ (ПАВ). Присутствие ПАВ вызывает значительное воздуховлечение, увеличивает пористость материала и, как следствие, снижает его прочность.

Теоретически этих недостатков лишены материалы на водонерастворимых полимерах. Однако в этом случае возникает проблема совместимости гидрофобных полимерных материалов с водными растворами минерального вяжущего. Для повышения совместимости с водой используют эмульгаторы (для жидкофазных полимеров – эмульгаторы смол) или ПАВ для твердофазных порошкообразных полимеров [5], но в этом случае проблема недостаточной устойчивости к водным растворам возникает вновь. Кроме того, частицы полимера, изолированные друг от друга стабилизирующими веществами, не образуют сплошной системы (полимерного каркаса) и фактически играют роль инертного наполнителя, что не позволяет в полной мере использовать их достоинства, снижает прочностные характеристики материала.

Для решения проблемы совместимости водонерастворимых полимеров с водными растворами минеральных вяжущих была предпринята попытка использовать эффект совместимости с водой смеси двух несовместимых с водой по отдельности веществ – порошкообразного полиэтилена и отработанного минерального масла [6]. Содержащиеся в таком масле полярные группы позволяли ему выполнять функцию поверхностно-активного вещества. Нами была исследована возможность замены части минерального масла нефтью, учитывая, что в ее составе содержится много полярных веществ.

Выяснилось, что такой композиционный материал действительно может быть получен. При смешивании в равных объемах нефти, масла и воды, после добавки определенного количества полимерного порошка образовывалась их смесь, которая не расслаивалась в состоянии покоя. Установлено, что строение такой квазиколлоидной системы соответствует изображению на рисунке 1.



1 – частица полиэтиленового порошка; 2 – слой молекул масла;
3 – слой полярных молекул нефти; 4 – вода

**Рисунок 1 – Строение частицы квазиколлоидной системы
полиэтилен – масло – нефть – вода**

Однако, хотя такая композиция хорошо совмещалась с водными растворами минеральных вяжущих (гипса, портландцемента), прочность материала, полученного после отверждения минерального вяжущего и термообработки для расплавления полимерной фракции, была невелика. Причина заключалась в том, что частицы полимера образовывали самостоятельную фазу, слабо связанную с минеральной фазой вследствие наличия на поверхности смазки, практически сводящей на нет адгезию полимера к минеральной составляющей материала. Фактически частицы полимера в таком материале играли роль пор, в такой же степени снижая прочностные характеристики материала.

Для улучшения физико-механических характеристик материала минеральное масло было заменено на высыхающее растительное масло, точнее олифу. Исследования совместимости олифы с полиэтиленом показали, что порошкообразный полиэтилен и олифа смешиваются в любых соотношениях без расслоения на отдельные фазы. При термообработке смеси жидкой олифы с полимером в формах могут быть получены изделия. В том числе – пленки методом прессования между нагретыми плитами пресса. Однако прочность таких изделий невысока, ниже прочности полиэтиленовых пленок с таким же содержанием минерального масла. Так прочность на разрыв полиэтиленовых пленок, сформированных методом «горячего» прессования на гидравлическом прессе ПГПР с электроподогреваемыми плитами ($T = 415...453$ К, $p = 5$ МПа) и содержащих 50 % минерального масла МС-20, составила 6...8 МПа. Пленки, сформированные в аналогичных условиях и содержащие вместо минерального масла такое же количество натуральной олифы на льняном масле, имели прочность 0,9...1,5 МПа. По-видимому, при быстром нагреве (1,5...2 мин) окисление олифы не успевает произойти, и не формируется система из двух взаимопроникающих структурных элементов.

Смесь олифы с полиэтиленом хорошо совмещается с водными растворами гипса и цемента. При перемешивании композиции на основе олифы, полиэтилена и водных растворов минерального вяжущего наблюдается значительное воздухововлечение, что в данном случае имеет положительное значение, так как создает условия для окисления (полимеризации) олифы. Тем не менее, процесс полимеризации олифы в этих условиях требует значительно большего времени. Так на рисунках 2, 3 приведены результаты испытаний прочности на сжатие образцов (балочки 40×40×160 мм), сформированных из смеси строительного гипса Г5 с водой (1:1 по массе) с таким же объемом смеси полиэтилена с натуральной олифой на подсолнечном масле (1:1 по массе). Полученные результаты показывают, что после отвердевания гипса, что согласно [7] требует не более 2 ч, прочность образцов, сформированных без нагрева, практически не изменяется в зависимости от времени (рисунок 2). Учитывая, что полимеризация олифы даже в тонком слое требует не менее 24 ч [7], можно утверждать, что в этих условиях олифа не успевает окислиться, и прочность образцов обусловлена только прочностью гипса. Поскольку значительная часть объема образцов занята смесью полиэтилена с неотвержденной олифой, не связанными с гипсом адгезионно, прочность образцов значительно ниже нормируемой (5 МПа).

После отверждения минерального вяжущего и нагрева образцов выше температуры плавления полиэтилена (150 °С) полимеризация (окисление) олифы, по-видимому, ускоряется, так как прочность образцов существенно возрастает (рисунок 3). При этом после 6-7 часов нагрева намечается тенденция снижения прочности, что можно объяснить процессами термоокислительной деструкции полимерного материала, приводящими к уменьшению его прочности [8].

Таким образом, после охлаждения образуется материал, характеризующийся наличием трех непрерывных взаимопроникающих структур – минеральной, образующей-

ся за счет отверждения гипса, структуры синтетического полимера (термопласта) – за счет заполнения расплавом полиэтилена пор и дефектов в образцах и структуры искусственного полимера (реактопласта), образующегося при окислении олифы.

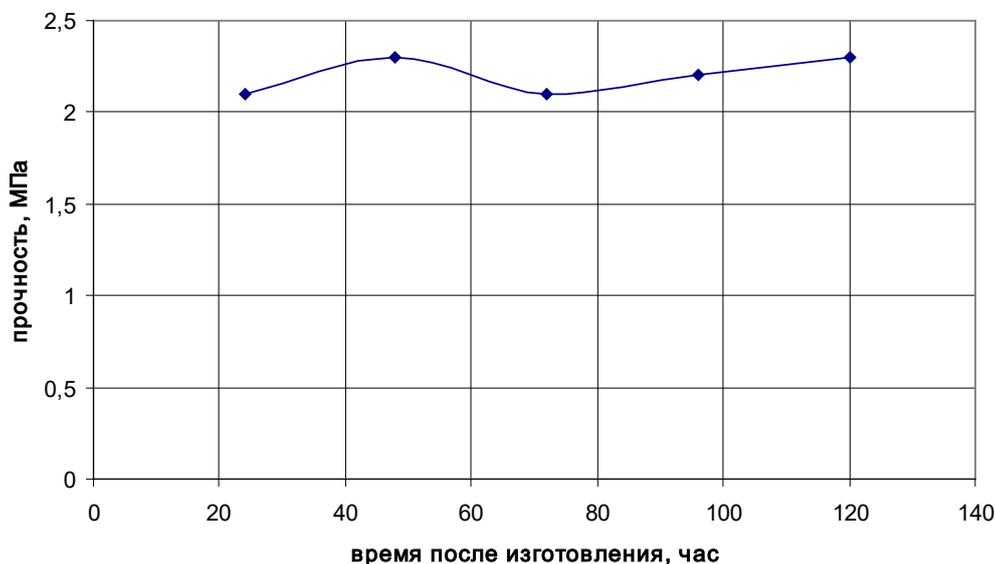


Рисунок 2 – Изменение во времени прочности на сжатие образцов системы гипс – олифа – ПЭ, сформированных без нагрева

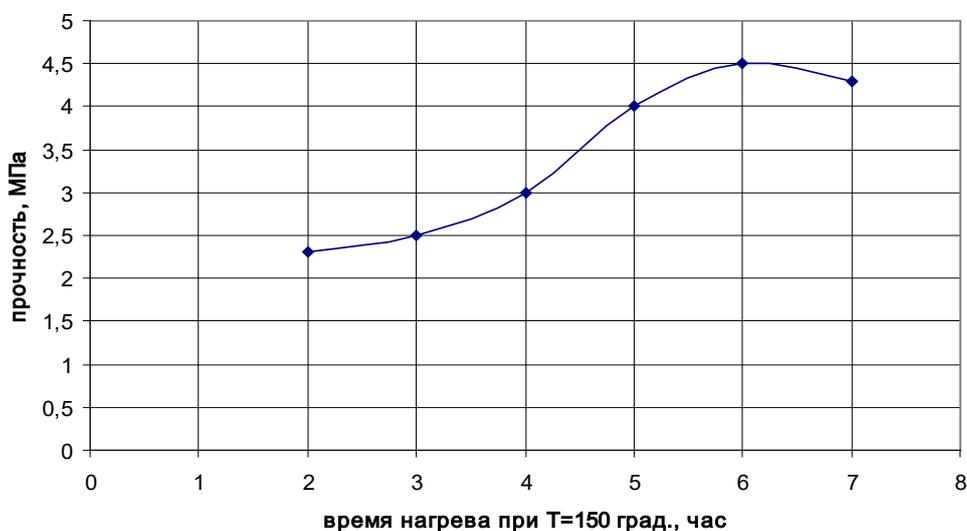
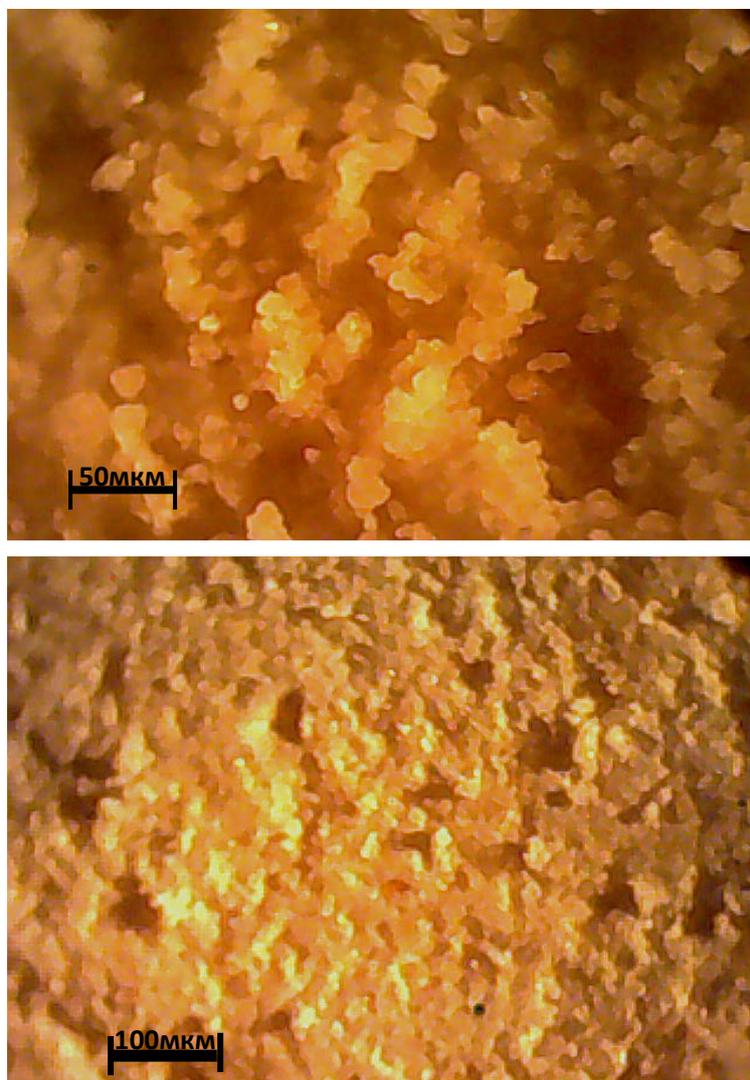


Рисунок 3 – Прочность на сжатие образцов системы гипс – олифа – ПЭ в зависимости от времени нагрева при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Микрофотографии, приведенные на рисунке 4, показывают, что частицы полиэтилена, свариваясь между собой, образуют пространственный каркас, покрытый с поверхности затвердевшей масляной пленкой. Дополнительную прочность такой системе придает минеральный каркас из кристаллов $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Полученный материал имеет низкую плотность ($0,6 \dots 0,7\text{ г/см}^3$), обусловленную большим количеством пор, благодаря чему не тонет в воде (рисунок 5).

Водопоглощение гипсополимерных образцов значительно снижается по сравнению с образцами из гипса без полимерных добавок. Так, после выдержки при полном

погружении в воду в течение 100 часов масса гипсовых образцов (гипс Г5 – вода 1:1, начало испытаний через 48 часов после изготовления) увеличилась в среднем на 33...35 %. В этих же условиях масса гипсополимерных образцов, сформированных по описанной выше технологии, возросла всего на 5...8 %.



Образцы изготовлены из смеси строительного гипса Г5 с водой (1:1 по массе) с таким же объемом смеси полиэтилена с натуральной олифой на подсолнечном масле (1:1 по массе)

Рисунок 4 – Структура гипсополимерных образцов при различном увеличении

По основным физико-механическим свойствам такие гипсополимерные образцы напоминают изделия из древесины. Их плотность отвечает средней плотности древесины таких пород деревьев, как лиственница, береза, дуб, клен ($\rho = 550-740 \text{ кг/м}^3$ [9]). Определяющий параметр прочности древесины (прочность на сжатие поперек волокон $\sigma_{сж} = 3,1...8 \text{ МПа}$) имеет близкие значения к прочности на сжатие гипсополимерных образцов [3, 9]. Как и древесина гипсополимерные материалы являются плохими проводниками тепла, могут механически обрабатываться теми же способами (сверление, резание, строгание). В частности, образец на рисунке 5 обработан методом строгания.



Рисунок 5 – Испытание гипсополимерного образца на стойкость к воде

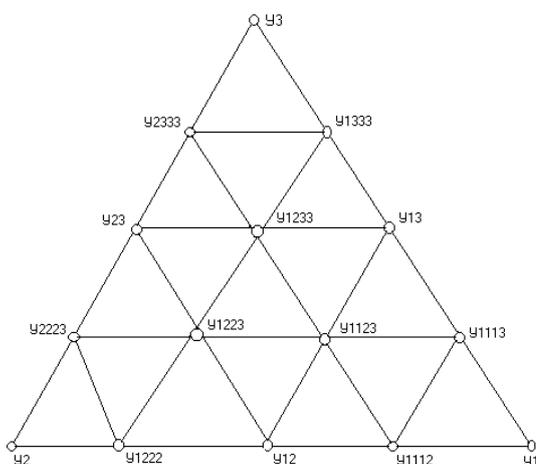


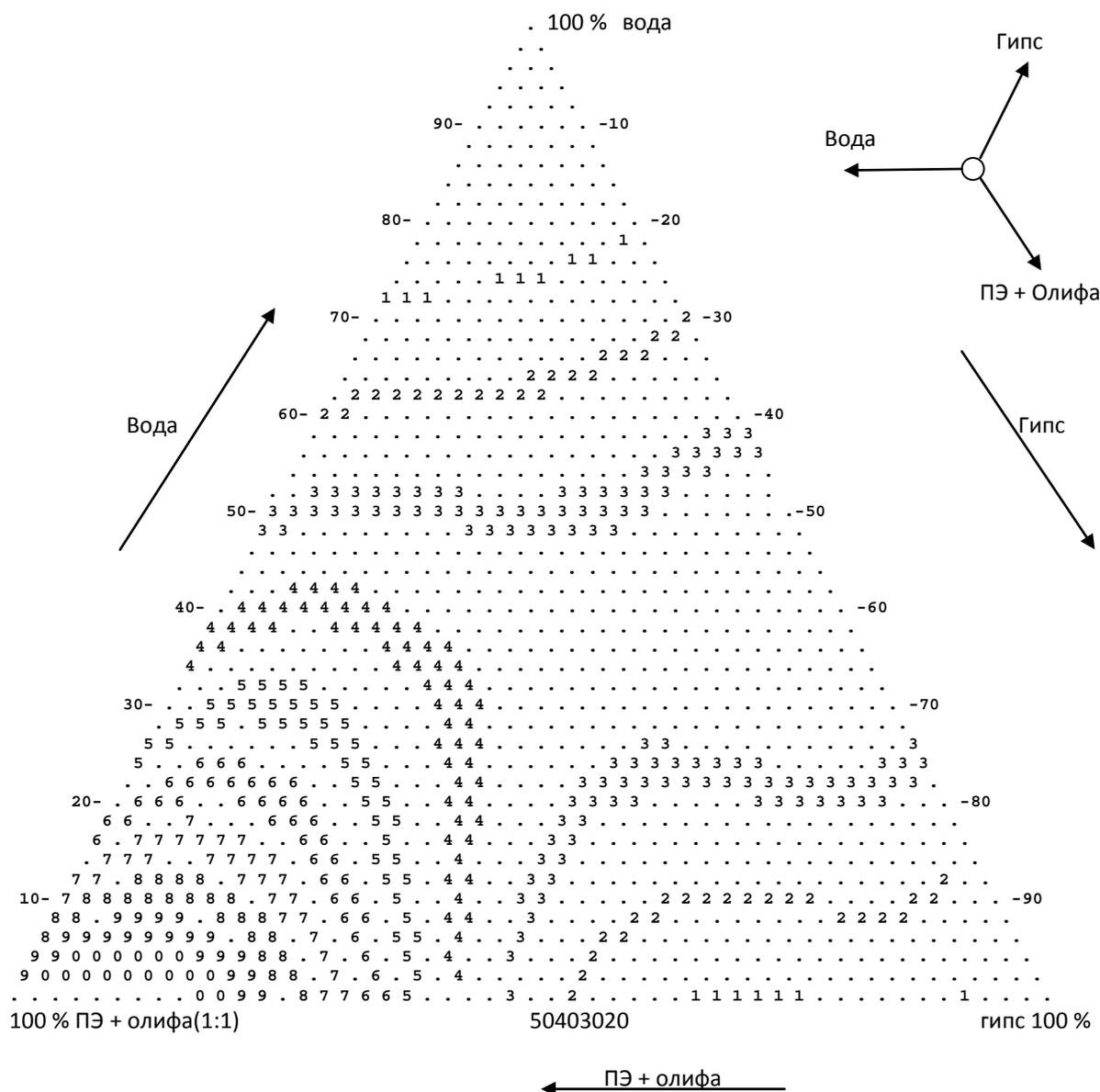
Рисунок 6 – Решетка 4-й степени, используемая в симплекс-решетчатом планировании, с обозначением откликов

Нахождение оптимального состава многокомпонентной системы весьма сложная задача. Нами для оптимизации состава гипсополимерных материалов использован метод симплекс-решетчатого планирования, позволяющий при помощи сравнительно небольшого числа экспериментов оценивать зависимость свойств от состава во всем диапазоне возможных концентраций компонентов. В таблице 1 приведена матрица планирования, в которой представлены результаты экспериментов по определению прочности на сжатие исследуемых образцов, проведенных в узловых точках симплексной решетки (рисунок 6).

По этим данным, используя уравнение для определения разрушающего напряжения [10], с помощью специальной компьютерной программы рассчитывали координаты изолиний постоянного значения свойства (прочности на сжатие) и наносили их на треугольную диаграмму (рисунок 7).

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента по определению прочности на сжатие образцов системы полиэтилен – олифа – гипс

Гипс полуводный (порошок) x_1 , % мас.	Вода x_2 , % мас.	Полиэтилен + олифа (1:1) x_3 , % мас.	Прочность на сжатие Y , МПа
100	0	0	$Y_1 = 0$
0	100	0	$Y_2 = 0$
0	0	100	$Y_3 = 15$
50	50	0	$Y_{12} = 5,2$
50	0	50	$Y_{13} = 3,9$
0	50	50	$Y_{23} = 4,3$
75	25	0	$Y_{1112} = 4,5$
25	75	0	$Y_{1222} = 2,1$
75	0	25	$Y_{1113} = 1,5$
25	0	75	$Y_{1333} = 1,3$
0	75	25	$Y_{2223} = 1,1$
0	25	75	$Y_{2333} = 7,5$
50	25	25	$Y_{1123} = 3,5$
25	50	25	$Y_{1223} = 3,3$
25	25	50	$Y_{1233} = 4,5$



Прочность Y , соответствующая цифрам на изолиниях:

- 1 – $Y = 1,5$ МПа; 2 – $Y = 3$ МПа; 3 – $Y = 4,5$ МПа; 4 – $Y = 6$ МПа; 5 – $Y = 7,5$ МПа;
- 6 – $Y = 9$ МПа; 7 – $Y = 10,5$ МПа; 8 – $Y = 12$ МПа; 9 – $Y = 13,5$ МПа; 0 – $Y = 15$ МПа

Рисунок 7 – Трехкомпонентная диаграмма, полученная путем обработки методом симплекс-решетчатого планирования результатов исследования прочности на сжатие образцов из композиций (ПЭ+олифа) – гипс – вода

Анализ диаграммы свидетельствует, что соотношение вода – гипс 1:1 является наиболее оптимальным. При его изменении в сторону относительного увеличения содержания воды или гипса прочность заметно снижается.

При этом в случае оптимального соотношения вода – гипс (1:1) увеличение содержания полимерного компонента (ПЭ + олифа) вплоть до 50 % практически не влияет на прочность материала. Уменьшение содержания гипса приводит к тому, что плотность сетки минерального каркаса также уменьшается, увеличивается его пористость. Обусловленное этим снижение прочности компенсируется увеличением прочности каркаса полимерного. При дальнейшем увеличении содержания полимерного компонента

прочность на сжатие существенно возрастает, что обусловлено тем, что сплошной минеральный каркас, фактически теряющий функцию упрочняющего элемента при таком содержании гипса, и играющий роль глобального дефекта, распадается на отдельные фрагменты. В этом случае его влияние на прочность уменьшается, он становится подобным влиянию инертного дисперсного наполнителя.

Данные, приведенные в таблице 2, использованы при построении трехкомпонентной диаграммы зависимости плотности гипсополимерных образцов от их состава (рисунок 8).

Таблица 2 – Матрица планирования эксперимента
по определению плотности образцов системы полиэтилен – олифа – гипс

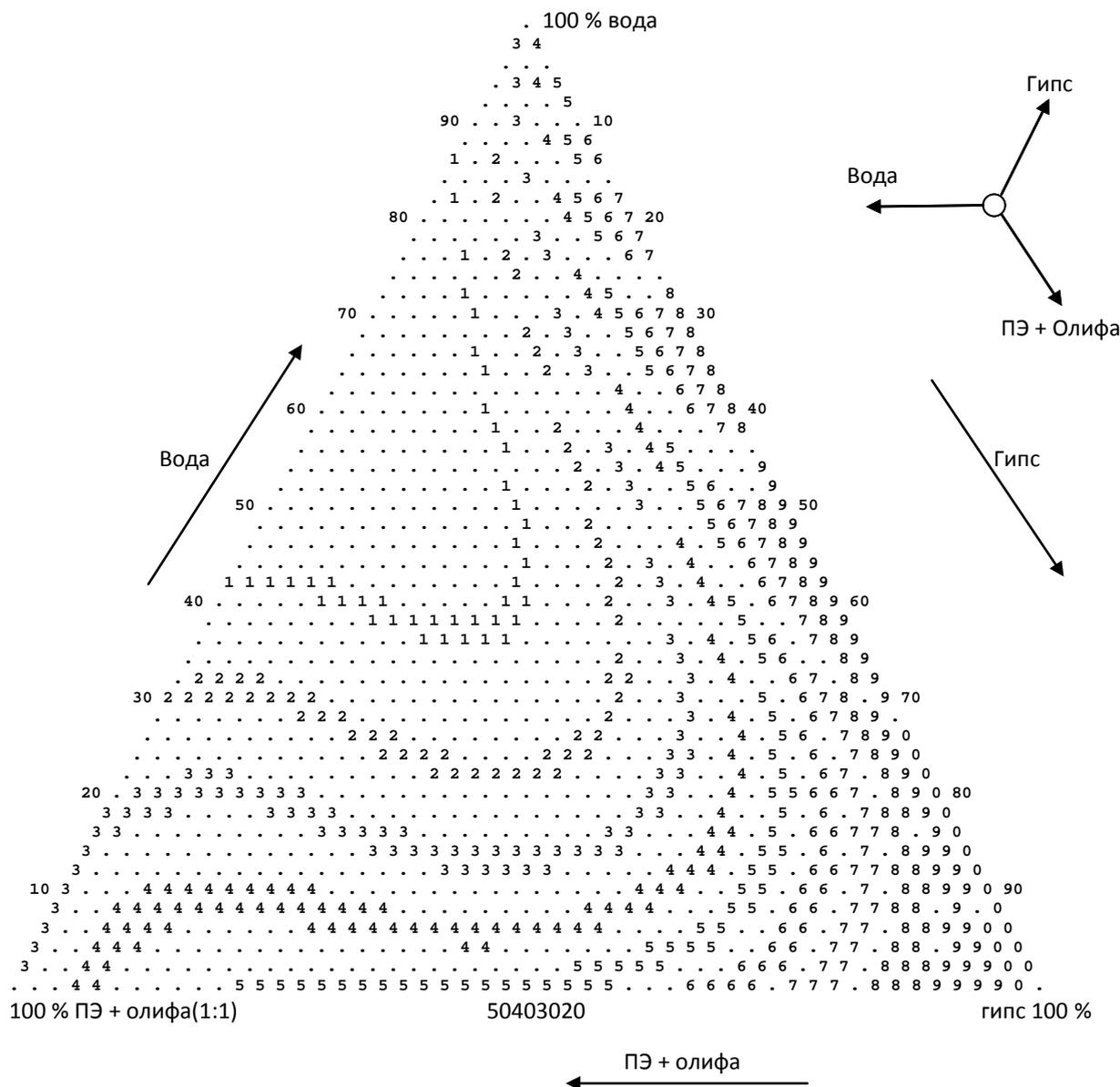
Гипс полуводный (порошок) x_1 , % мас.	Вода x_2 , % мас.	Полиэтилен + олифа (1:1) x_3 , % мас.	Плотность Y , г/см ³
100	0	0	$Y_1 = 2,5$
0	100	0	$Y_2 = 1,0$
0	0	100	$Y_3 = 0,9$
50	50	0	$Y_{12} = 2,2$
50	0	50	$Y_{13} = 1,33$
0	50	50	$Y_{23} = 0,3$
75	25	0	$Y_{1112} = 2,4$
25	75	0	$Y_{1222} = 1,9$
75	0	25	$Y_{1113} = 1,72$
25	0	75	$Y_{1333} = 1,3$
0	75	25	$Y_{2223} = 0,2$
0	25	75	$Y_{2333} = 0,75$
50	25	25	$Y_{1123} = 0,8$
25	50	25	$Y_{1223} = 0,45$
25	25	50	$Y_{1233} = 0,64$

Рассмотрение диаграммы показывает, что минимальная плотность образцов характерна для составов, содержащих 10...20 % гипса, 50...60 % воды и 30...40 % пластифицированного олифой полиэтилена (1:1). Это обусловлено низкой плотностью полимерного компонента и большим количеством пор и других дефектов структуры, остающихся после испарения воды в процессе формования образцов. При соотношении гипса и воды 1:1 плотность композиции изменяется незначительно (0,7...1,0 г/см³) в диапазоне концентраций полимерного компонента (смесь полиэтилена с олифой) 20...100 %. При меньшем содержании полимерного компонента, плотность композиции резко возрастает. Таким образом, характер зависимости плотности и прочности от содержания полимерного компонента является аналогичным, что подтверждает приведенные ранее соображения о механизме влияния структурных характеристик материала на показатели его прочности.

Данные, приведенные в таблице 3, использованы для построения трехкомпонентной диаграммы зависимости водопоглощения гипсополимерных образцов от их состава (рисунок 9).

Для успешной работы компьютерной программы построения диаграммы необходимо вводить значения параметров для всех узлов симплексной решетки. Один из узлов соответствует чистой воде, для которой, естественно, такое свойство как водопоглощение смысла не имеет. Тем не менее, введение нуля водопоглощения для этой точки диаграммы приводит к искажению истинного характера зависимости этого свойства

от состава композиции, так как для всех образцов существует общая тенденция повышения водопоглощения при увеличении содержания воды, обусловленная увеличением числа дефектов структуры (поры, капилляры). Поэтому для этого узла решетки было выбрано условное значение водопоглощения – 50 %. При этом (как показали проверочные эксперименты) только верхняя часть диаграммы (для содержания воды более 80 %) не отражает истинной картины водопоглощения. Такие составы композиционного материала не имеют практического значения, поэтому их можно исключить из рассмотрения.



Плотность, соответствующая цифрам на изолиниях:
 1 – $Y = 0,43 \text{ г/см}^3$; 2 – $Y = 0,66 \text{ г/см}^3$; 3 – $Y = 0,89 \text{ г/см}^3$; 4 – $Y = 1,12 \text{ г/см}^3$; 5 – $Y = 1,35 \text{ г/см}^3$;
 6 – $Y = 1,58 \text{ г/см}^3$; 7 – $Y = 1,81 \text{ г/см}^3$; 8 – $Y = 2,04 \text{ г/см}^3$; 9 – $Y = 2,27 \text{ г/см}^3$; 0 – $Y = 2,5 \text{ г/см}^3$

Рисунок 8 – Трехкомпонентная диаграмма, полученная путем обработки методом симплекс-решетчатого планирования результатов исследования плотности образцов из композиций (ПЭ+олифа) – гипс – вода

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента по определению водопоглощения образцов системы полиэтилен – олифа – гипс

Гипс полуводный (порошок) x_1 , % мас.	Вода x_2 , % мас.	Полиэтилен + олифа (1:1) x_3 , % мас.	Водопоглощение Y , %
100	0	0	$Y_1 = 55$
0	100	0	$Y_2 = 50^*$
0	0	100	$Y_3 = 2$
50	50	0	$Y_{12} = 34$
50	0	50	$Y_{13} = 5$
0	50	50	$Y_{23} = 12$
75	25	0	$Y_{1112} = 31$
25	75	0	$Y_{1222} = 39$
75	0	25	$Y_{1113} = 19$
25	0	75	$Y_{1333} = 3$
0	75	25	$Y_{2223} = 13$
0	25	75	$Y_{2333} = 11$
50	25	25	$Y_{1123} = 15$
25	50	25	$Y_{1223} = 12$
25	25	50	$Y_{1233} = 7$

*Значения показателя условные, необходимые для работы программы, т.к. определение истинных показателей не имеет смысла. Величина показателя выбрана исходя из удобства построения диаграммы

Как показывает диаграмма на рисунке 9, существенное увеличение водопоглощения наблюдается при содержании полимерного компонента менее 40...50 %. В этом случае формирующийся полимерный каркас содержит большое число открытых капилляров и пор, по которым вода может проникать внутрь образцов.

Для определения оптимального состава композиционного материала на треугольную диаграмму, по осям которой отложено процентное содержание компонентов, наносили, используя данные диаграмм на рисунках 7-9, изолинии предельно допустимого, исходя из эксплуатационных требований, значения свойств (рисунок 10).

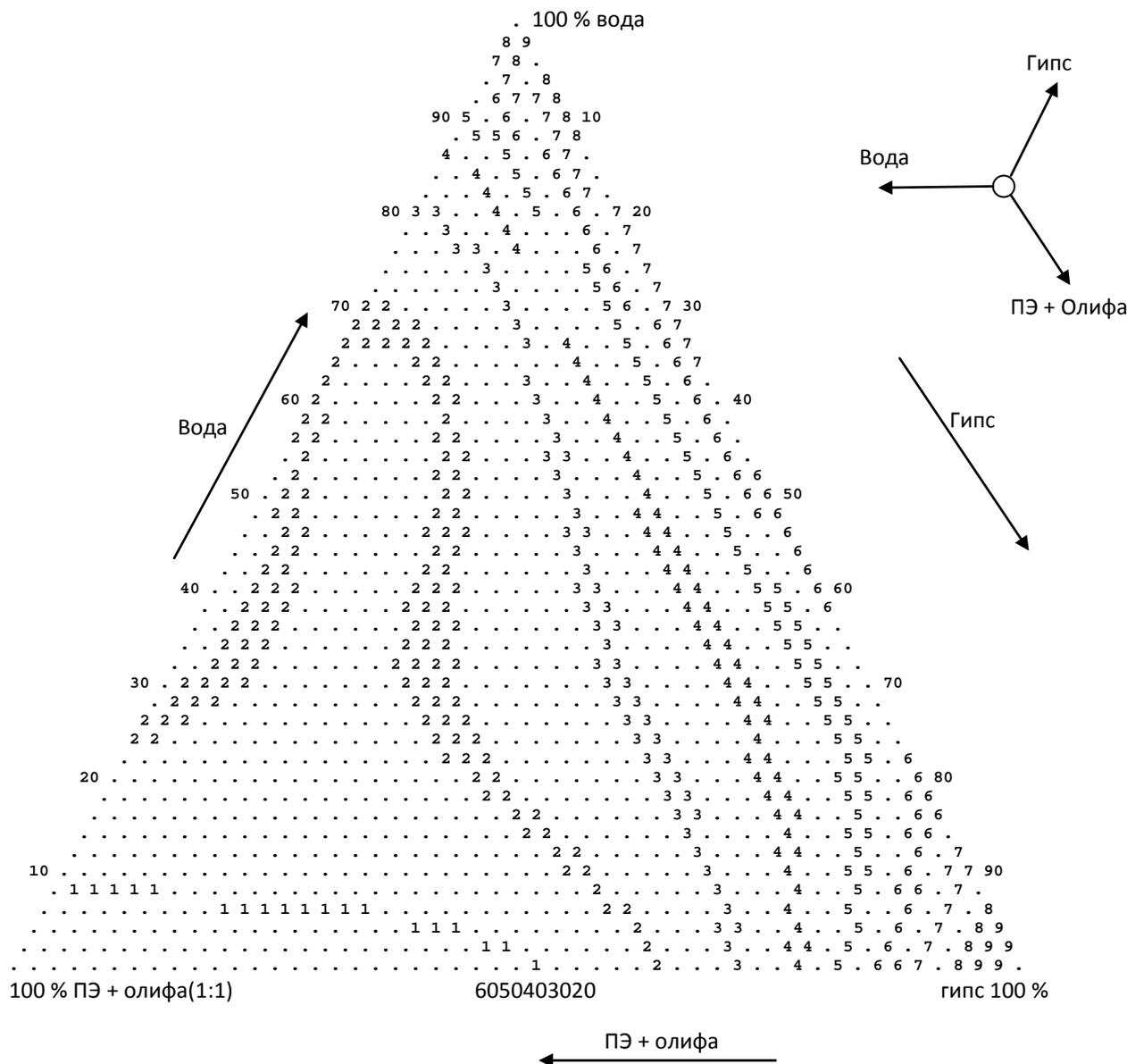
Значение прочности на сжатие принимали равным не менее 6 МПа (линия 1), чтобы материал по прочности не уступал исходному гипсу Г5. Значение плотности (линия 2) принимали не более 0,89 г/см³, ориентируясь на плотность исходного полиэтилена. Предельное значение водопоглощения принимали равным 11 % (линия 3), что в несколько раз меньше водопоглощения гипсовых образцов и примерно соответствует содержанию воды в комнатно-сухой древесине [7].

Изолинии 1-3 выделяют на диаграмме область составов, характеризующую оптимальным сочетанием свойств исследуемого материала. Согласно этой диаграмме оптимальным является содержание гипса 5...30 %, полимерного компонента (ПЭ + олифа 1:1) – 40...80 %, воды – 15...40 %. Центральная часть этой области имеет координаты: гипс – 15 %, полимерный компонент – 55 %, вода – 30 %.

Выводы

Показано, что совместимость неполярных водонерастворимых полимеров с водными суспензиями гипсового минерального вяжущего может быть достигнута путем смешивания полимера с высыхающим растительным маслом, которое выполняет в данном случае функцию ПАВ. Установлено, что формируемый при затвердевании такой

смеси материал, характеризуется наличием трех непрерывных взаимопроникающих структур – минеральной, образующейся за счет отверждения гипса, структуры синтетического полимера (термопласта) – за счет заполнения расплавом полимера пор и дефектов в образцах и структуры искусственного полимера (реактопласта), образующегося при полимеризации (окислении) растительного масла. Исследована структура и физико-механические свойства такого материала.



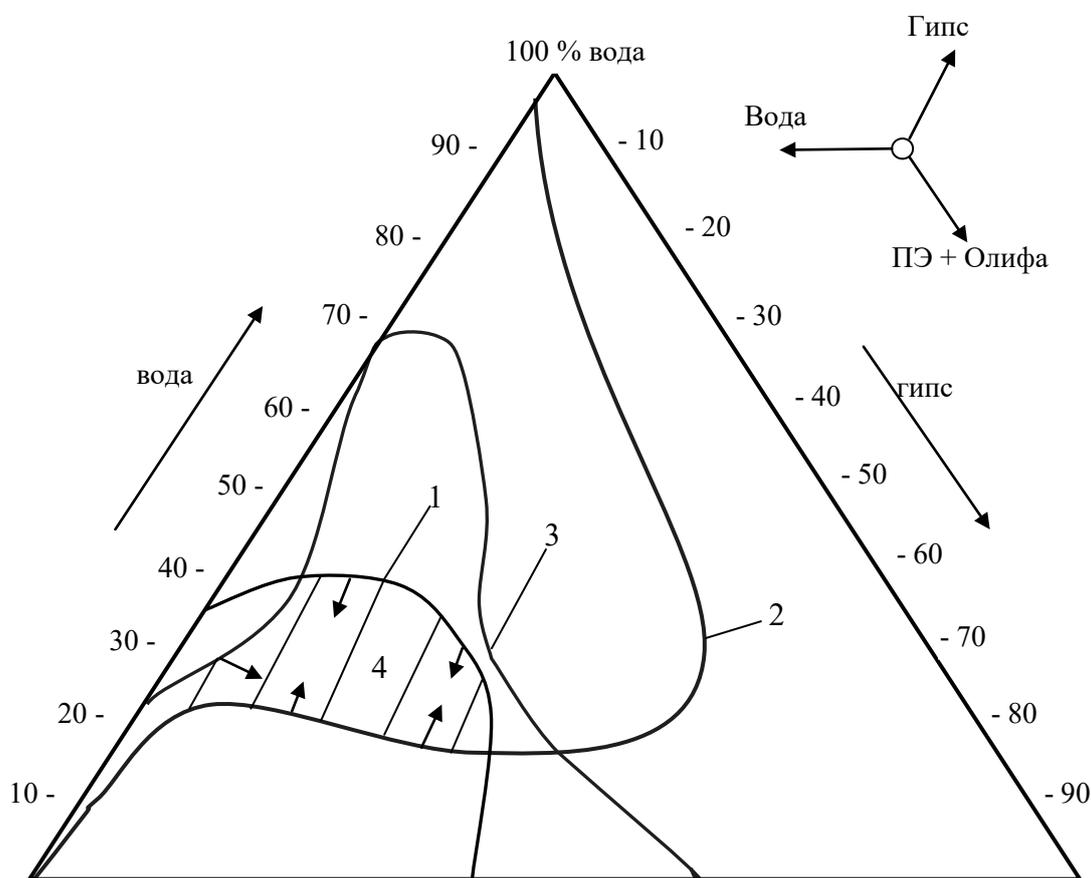
Водопоглощение, соответствующее цифрам на изолиниях:

- 1 – $Y = 5,5 \%$; 2 – $Y = 11 \%$; 3 – $Y = 16,5 \%$; 4 – $Y = 22 \%$; 5 – $Y = 27,5 \%$; 6 – $Y = 33 \%$;
- 7 – $Y = 38,5 \%$; 8 – $Y = 44 \%$; 9 – $Y = 49,5 \%$; 0 – $Y = 55 \%$

Область вблизи верхнего угла диаграммы (более 80 % воды) не отражает реальной картины водопоглощения, поскольку верхней точке симплексной решетки отвечает параметр Y_2 , отвечающий водопоглощению воды чистой водой – характеристика, не имеющая смысла, и чисто условно принятая равной 50 %

Рисунок 9 – Трехкомпонентная диаграмма, полученная путем обработки методом симплекс-решетчатого планирования результатов исследования водопоглощения образцов из композиций (ПЭ+олифа) – гипс – вода

Состав полученного гипсополимерного материала оптимизирован по критериям эксплуатационных свойств. Показано, что оптимальным является следующее соотношение компонентов: гипс 5...30 %, полимерный компонент (ПЭ + олифа 1:1) – 40...80 %, вода – 15...40 %.



1 – изолиния постоянного значения прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 6$ МПа; 2 – изолиния постоянного значения плотности $\rho = 0,89$ г/см³; 3 – изолиния постоянного значения водопоглощения $W = 11$ %; 4 – область оптимального состава; стрелками показано желаемое изменение свойства

Рисунок 10 – Нахождение состава композиций гипсополимера, оптимального по критериям прочности, плотности и водопоглощения

Список использованных источников

1. **Петров, В.П.** Гипс: Большая советская энциклопедия / В.П. Петров. – М.: Советская энциклопедия, 1971. – Т. 6. – С. 549.
2. **Коган, Г.С.** Гипсовые вяжущие материалы: Большая советская энциклопедия / Г.С. Коган. – М.: Советская энциклопедия, 1971. – Т. 6. – С. 549-550.
3. **Коган, Г.С.** Гипсовые и гипсобетонные изделия: Большая советская энциклопедия / Г.С. Коган. – М.: Советская энциклопедия, 1971. – Т. 6. – С. 550-551.
4. **Волженский, А.В.** Минеральные вяжущие вещества (технология и свойства): учеб. для вузов / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с.

-
5. **Попов, К.Н.** Строительные материалы и конструкции / К.Н. Попов, М.Б. Дкуда. – М.: Высш. шк., 1987. – 72 с.
 6. Полимерная композиция: а.с. 768225 СССР, МКИ С 08 L 23/06; С 08 К 9/00, 5/16 / В.А. Гольдаде, Я.М. Золотовицкий, А.С. Неверов, Л.С. Пинчук, В.С. Усс; Специальное конструкторско-технологическое бюро аналитического приборостроения и Институт механики металлополимерных систем АН Белорусской ССР. – № 2712091/23-05; заявл. 05.12.78; опубл. 23.11.86 // Открытия. Изобрет. – 1986. – № 43.
 7. Строительное материаловедение: учеб. пособие / под общ. ред. В.А. Невского. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 571 с.
 8. **Годовский, Ю.К.** Теплофизические методы исследования полимеров / Ю.К. Годовский. – М.: Химия, 1976. – 216 с.
 9. **Богомолов, Б.Д.** Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений / Б.Д. Богомолов. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 400 с.
 10. **Старовойтов, Э.И.** Сопротивление материалов: учеб. для студентов технических вузов / Э.И. Старовойтов. – Гомель: БелГУТ, 2004. – 376 с.
-

Kolomiets A.V., Neverov A.S., Vlasenko D.A.

Composite materials on the basis of mineral binding agents and polymeric additives

In the article the problem of compatibility of water insoluble polymers with water solutions of the mineral binding agents is considered. The complex of theoretical and experimental studies for optimization of the material composition and the way of its producing is carried out. Questions of influence of composition, structure and ways of producing the composite material on its operational properties are considered.

Поступила в редакцию 24.12.2014 г.

УДК 553.6.08(047.1)(476)

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ СИЛИКАТНЫХ МИНЕРАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Лиопо В.А., Овчинников Е.В., Никитин А.В., Ситкевич Ф.А. (УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь)

В статье рассмотрены причины возникновения активных зарядовых центров на поверхности частиц модификатора. Показано, что в слоистых силикатах появление таких центров обусловлено их ярко выраженными электронными свойствами. Это, наряду с другими факторами, делает слоистые силикаты высокоэффективными модификаторами при создании композиционных материалов различного назначения.

Введение

Силикатные минералы с древних времен использовались либо в качестве строительных материалов, либо являлись сырьем для создания таких материалов. Эти минералы широко распространены в природе, а изменчивость их состава позволяет выбрать необходимое сырье для получения конечного продукта с требуемым составом. Значимость силикатов для строительной индустрии сохранилась до наших дней. В последние десятилетия силикаты широко используются в качестве наполнителей-модификаторов, например, на полимерной основе [1]. Так как зачастую силикатные добавки имеют размеры частиц в нанодиапазонных интервалах, то требуется более строгий учет их кристаллохимических особенностей. Зная структурно-химические параметры этих частиц, можно более эффективно управлять свойствами композита. Громадное число природных силикатных материалов требует их специальной классификации. Нами проведено исследование различных способов группировки силикатных материалов с учетом работ различных авторов.

При создании нанонаполнителей-модификаторов полимерных композитов основным требованием является наличие у наночастиц активных зарядовых поверхностных центров (АЗПЦ), на которые влияют особенности структуры наночастиц. Этот аспект также потребовал дополнительного анализа.

Структурно-химические элементы кристаллов силикатов

Традиционно к силикатным минералам относятся природные кристаллические объекты, в состав которых входят атомы кремния.

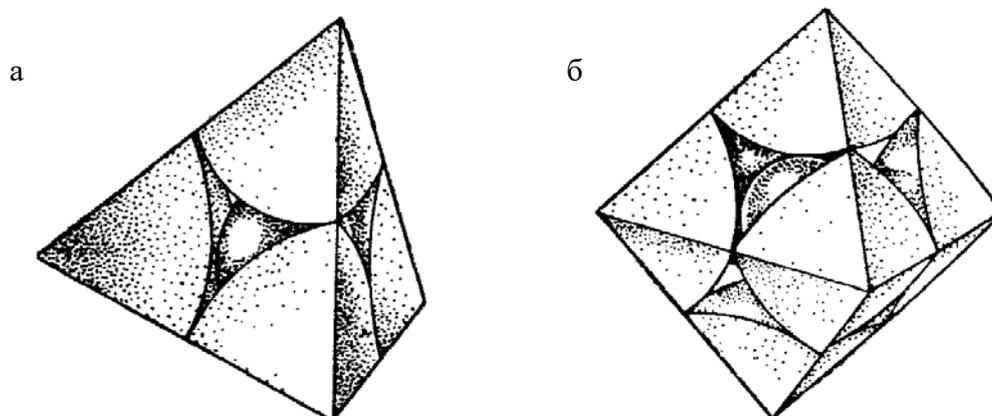
Структура силикатов включает кислородный каркас, созданный в основном в соответствии с принципами плотных и плотнейших шаровых упаковок. Эти упаковки формируют наноразмерные полиэдры двух типов: октаэдра и тетраэдра (рисунок 1).

В центре тетраэдров расположены ионы кремния, в октаэдрах – ионы металлов с валентностью 2^+ , 3^+ , 4^+ .

Кристаллохимическая формула тетраэдра как структурной единицы имеет вид SiO_4^{4-} . Эти тетраэдры объединяются друг с другом через общие кислородные вершины. При этом может изменяться угол Si-O-Si, что обуславливает различные мотивы структур с общей тетрагональной основой (рисунок 2).

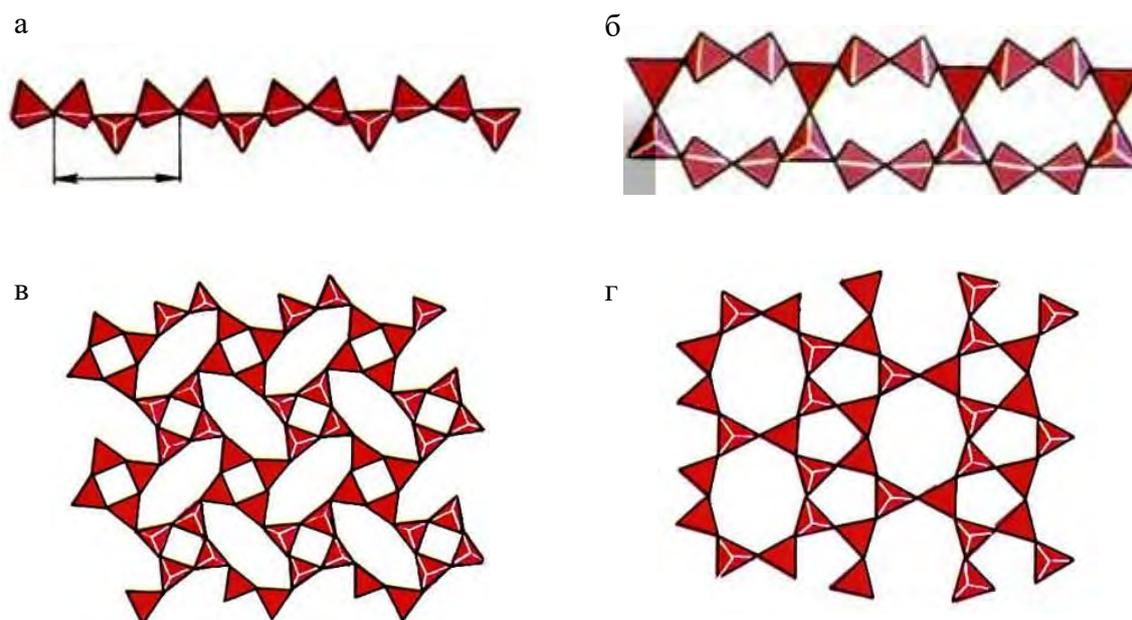
Наряду с тетраэдрическими пустотами в плотнейшей упаковке шаров имеются октаэдрические пустоты [2]. Октаэдры, соединяясь друг с другом, могут образовать ок-

тетраэдрическую сетку (рисунок 3). Сочетания октаэдрических и тетраэдрических сеток формируют слоистые силикаты. Кроме слоистых известны каркасные и островные структуры силикатных материалов.



а – тетраэдр; б – октаэдр

Рисунок 1 – Кислородные структурные полиэдры



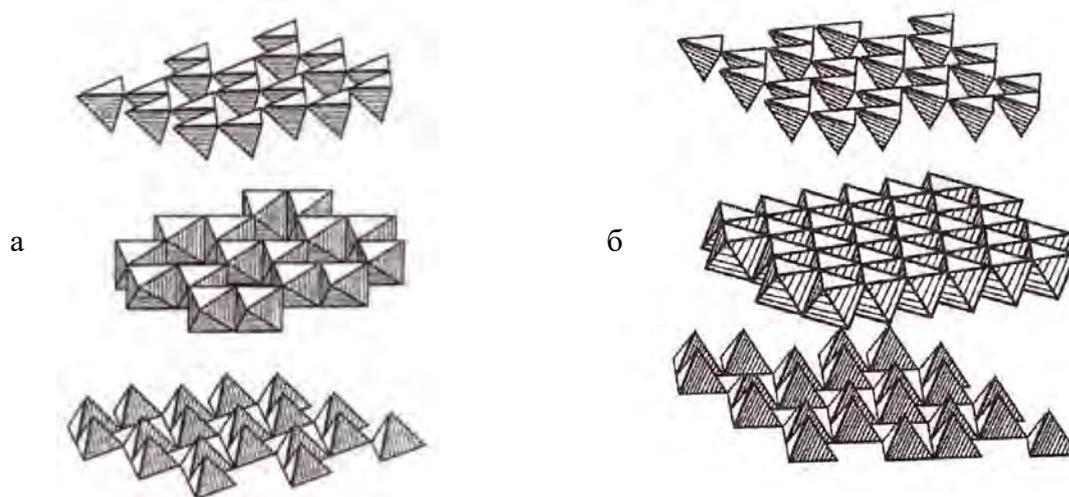
а – волластонитовая лента; б – ксонотритовая лента;
в – апофиллитовая сетка; г – окенитовая сетка

Рисунок 2 – Структуры с общей тетрагональной основой

Слюды как типичные слоистые силикаты

На рисунке 3 приведена аксонометрия структуры слюд, т.е. показано распределение по слоям структурных полиэдров. На рисунке видна структура слюд, которая представляет собой чередование октаэдрических и тетраэдрических сеток. Внутренние вершины тетраэдров (Т) являются и вершинами октаэдров (О). Слои ТОТ формируют элементарный слюдяной блок. Межатомное взаимодействие в пределах блока обуслов-

лено валентными силами. Взаимодействие между блоками носит Ван-дер-Ваальсовый характер. Именно поэтому слюды обладают совершенной спайностью. В межблочном (межслоевом) промежутке находятся ионы K, Na, Li, Ca, и др. В эту область могут проникать молекулы воды, что определяет степень гидратации.



а – мусковит; б – флогопит

Рисунок 3 – Аксонометрия полиэдрических структур

В октаэдрической сетке могут размещаться как трехвалентные (мусковиты), так и двухвалентные атомы (флогопиты, биотиты). В соответствии с принципом электростатической нейтральности в мусковитах из трех октаэдров занято только два (диоктаэдрическая слюда), во флогопите – все три (триоктаэдрическая слюда)

Слюды – это трехслойные силикаты. Для двухслойных силикатов элементарный блок включает две сетки ТО.

Среди большого числа силикатов наиболее часто встречающимися являются слоистые силикаты. Одна из первых классификаций силикатов, построенная на анализе слоистых силикатов, показана в [3], (таблица 1).

Систематизация силикатных минералов

Приведенная классификация описывает идеальные в кристаллохимическом отношении составы. Однако силикаты – это кристаллы, склонные к изоморфизму, поэтому приведенная таблица, конечно, содержит очень важную информацию, но ее трудно соотносить к реальным образцам.

На наш взгляд, наиболее полная и, главное, с логически обоснованной последовательностью таблица слоистых минералов приведена в работе А.А. Кашаева и Н.А. Фроловой [2]. Так как эта работа издана очень небольшим тиражом и малоизвестна специалистам, мы считаем необходимым привести данную классификацию с нашими дополнениями (таблица 2). В таблице каркасные структуры обозначены К, слоистые – С, двойники – Д. Подавляющее большинство минералов таблицы склонно к изоморфизму. При увеличении числа разновидностей рассматриваются кристаллы только одного состава. Если в кристалле возможно сосуществование локальных структур К- или С-типов, причем их объем не превышает объем нескольких ячеек, то символ структуры не приводится.

Таблица 1 – Минералы слоистых силикатов

Минерал	Химическая формула	d(001), межплоскостное расстояние (Å)
	Группа пирофиллита	
Пирофиллит	$Al_2(Si_4O_{10})(OH)_2$	9,97
Тальк	$Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$	9,41
Группа слюд		
Мусковит	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	9,94
Парагонит	$NaAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	9,92
Флогопит	$KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	10,08
Биотит	$K(Mg, Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	10,05
Лепидолит	$KLi_2Al(Si_4O_{10})(F, OH)_2$	9,88
Циннвальдит	$KLiFeAl(AlSi_3O_{10})(F, OH)_2$	9,90
Группа хрупких слюд		
Маргарит	$CaAl_2(Al_2Si_2O_{10})(OH)_2$	10,08
Зейбертит	$Ca(Mg, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$	10,02
Группа хлорита		
Общая формула	$(Mg, Al, Fe)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$	7,00
Группа вермикулита		
Вермикулит	$(Mg, Fe, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	14,30
Группа каолинита		
Каолинит Диксит Накрит	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	7,33
Галлуазит	$Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8 \cdot 4H_2O$	13,80

Таблица 2 – Основные минералогические типы силикатов

№	Название формулы	Число разновидностей	Структура
1	2	3	4
Слюдоподобный мотив			
1	Бериллонит, $NaBe(PO_4)$	1	С
2	Гр. вермикулита, $(Mg, Fe, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	3	С
3	Гр. галлуазита $Al_2(SiO_5)(OH)_4$	2	С
4	Каменит $NaH(Si_2O_5)(OH)_4$	1	С
5	Гр. каолинита $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	3	С
6	Кимрит $Ba(Al_2Si_2O_8)(4H_2O)$	1	СД
7	Кристобалит SiO_2	1	К
8	Гр. монтмориллонита $Na(Al, Fe, Mg)_4(Si_8O_{20})(OH)_4nH_2O$	4	С
9	Гр. нефелина $KNa_3Al_4Si_4O_{16}$	4	К
10	Пентагонит $CaV(SiO_{16})OH_2O$	1	С
11	Петалит $LiAlSi_4O_{10}$	1	С
12	Рейерит $(Na, K)_2Ca_{14}(Si, Al)_{24}O_{60}(OH)_5 \cdot 5H_2O$	1	СД

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	
13	Санборнит BaSi_2O_5	1	С	
14	Гр. сапонита $(0,5\text{Ca},\text{Na})_{0,33}(\text{Mg},\text{Fe})_3(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$	5	С	
15	Гр. сепиолита $\text{Mg}_4(\text{Si}_2\text{O}_5)_3(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$	4	С	
16	Гр. серпентина $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	9	С	
17	Гр. слюд $(\text{K},\text{Na},\text{Ca},\text{Al}\dots\dots)_{2-3}(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	27	С	
18	Гр. тридимита SiO_2	2	К	
19	Тяньшанит $\text{KNa}_9\text{Ca}_2\text{Ba}_6(\text{Mn},\text{Fe})_6(\text{Ti},\text{Nb},\text{Ta})_6\text{Si}_{36}\text{B}_{12}\text{O}_{123}(\text{OH})_2$	1	С	
20	Федорит $(\text{K},\text{Na})_{2,5}(\text{Ca},\text{Na})_7(\text{Si},\text{Al})_{16}\text{O}_{38}(\text{OH},\text{F})_2$	1	СД	
21	Гр. хлорита	19	С	
Пиросмалитоподобный мотив				
22	Гр. гельвина $(\text{Mn},\text{Fe},\text{Zn})_4(\text{BeSiO}_4)_3\text{S}$	3	К	
23	Гр. канкринита $(\text{Na},\text{Ca},\text{K})_{7-8}(\text{AlSiO}_4)_6(\text{Cl},\text{SO}_4,\text{CO}_3,\text{S})_3\text{nH}_2\text{O}$	10	К	
24	Гр. содалита $(\text{Na},\text{Ca})_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{Cl},\text{SO}_4,\text{S})$	8	К	
25	Гр. пиросмалита $(\text{Fe},\text{Mn})_8\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH},\text{Cl})_{10}$	5	С	
26	Гр. шабазита $(\text{Al},\text{Ca},\text{Na})_3(\text{AlSi}_2\text{O}_6)_2\text{H}_2\text{O}$	6	К	
Апофиллитоподобный мотив				
27	Гр. апофиллита $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_8\text{H}_2\text{O}$	2	С	
28	Гадолинит $\text{FeY}_2\text{Be}_2(\text{SiO}_4)_2$	1	К	
29	Гармотом $\text{Ba}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\text{H}_2\text{O}$	1	К	
30	Данбурит CaB_2SiO_8	1	К	
31	Датолит $\text{CaBSiO}_4(\text{OH})$	1	К	
32	Дельхайэлит $(\text{Na},\text{K})_{10}\text{Ca}_5\text{Al}_6\text{Si}_{32}\text{O}_{80}(\text{Cl}_2,\text{F}_2,\text{SO}_4)_3\text{H}_2\text{O}$	1	СД	
33	Джилеспит $\text{BaFe}(\text{Si}_4\text{O}_{10})$	1	С	
34	Жисмондин $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	1	С	
35	Кавансит $\text{CaV}(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{OH}_2\text{O}$	1	С	
36	Карлтонит $\text{KNa}_4\text{Ca}_4\text{Si}_8\text{O}_{18}(\text{CO}_3)_4(\text{OH},\text{F})\text{H}_2\text{O}$	1	СД	
37	Гр. полевых шпатов $(\text{K},\text{Na},\text{Ca},\text{Ba})(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_8$	16	К	
38	Родзит $(\text{Ca},\text{Na},\text{K}_2)_8\text{Si}_{16}\text{O}_{40}\text{H}_2\text{O}$	1	СД	
39	Гр. скаполита $(\text{Na},\text{Ca})_4(\text{Al},\text{Si})_4(\text{Cl},\text{CO}_3)\text{O}_8$	5	К	
40	Филлипит $(\text{K},\text{Na},\text{Ca})_5\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\text{H}_2\text{O}$	1	СД	
Армстронгитоподобный мотив				
41	Армстронгит $\text{CaZr}(\text{Si}_5\text{O}_{15})_2\text{H}_2\text{O}$	1	С	
42	Гемиморфит $\text{Sn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$	1	К	
43	Делиит $\text{K}_2\text{Zr}(\text{Si}_6\text{O}_{15})$	1	С	
44	Сажинит $\text{HNa}_2\text{Ge}(\text{Si}_6\text{O}_{15})\text{nH}_2\text{O}$	1	С	
45	Даванит	$\text{K}_2\text{Be}(\text{Si}_6\text{O}_{15})$	1	С
46		$\text{KTi}(\text{Si}_6\text{O}_{15})$	1	С
47		$\text{K}_3\text{Nd}(\text{Si}_6\text{O}_{15})$	1	С
48		$\text{Na}_3\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{H}_2\text{O}$	1	К
Мелилитовый мотив				
49	Гардисонит $\text{Ca}_2(\text{ZnSi}_2\text{O}_7)$	1	С	
50	Гугиайт $\text{Ca}_2(\text{BeSi}_2\text{O}_7)$	1	С	

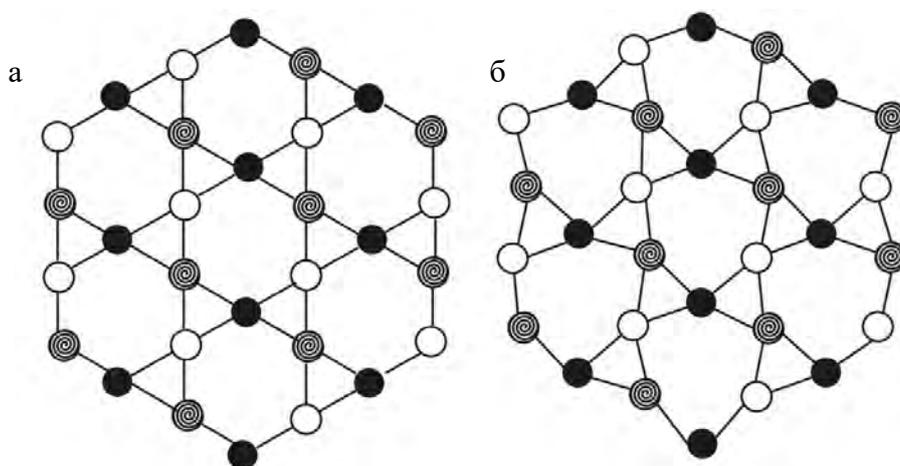
Окончание таблицы 2

1	2	3	4
51	Лейкофанит $\text{NaCa}(\text{BeSi}_2\text{O}_7)$	1	C
52	Гр. мелилита $(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Mg},\text{Al},\text{Si})_3\text{O}_7$	3	C
53	Мелифанит $\text{NaCa}(\text{BeSi}_2\text{O}_6\text{F})$	1	C
54	Сирлезит $\text{NaBSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$	1	
Ленточные мотивы			
55	Гр. амфибола $(\text{Na},\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe},\text{Al},\text{Mn})_7(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH},\text{F})_2$	50	
56	Виноградовит $\text{Na}(\text{TiO})_4(\text{Si}_2\text{O}_6)(\text{Si}_4\text{O}_{10})_n\text{H}_2\text{O}$		
57	Власовит $\text{Na}_2\text{Zr}(\text{Si}_4\text{O}_{11})$		
58	Силлиманит $\text{Al}(\text{AlSiO}_5)$		
59	Тухуалит $(\text{Na},\text{K})_2\text{Fe}^{2+}_2\text{Fe}^{3+}_3(\text{Si}_{12}\text{O}_{30})\text{H}_2\text{O}$		
60	Эвдидимит $\text{Na}_2\text{Be}_2(\text{Si}_6\text{O}_{15})\text{H}_2\text{O}$		
61	Эльпидит $\text{Na}_2\text{Zr}(\text{Si}_6\text{O}_{14})3\text{H}_2\text{O}$		
Прочие соединения			
62	Берилл $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$		
63	Бикитаит $\text{Li}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)\text{H}_2\text{O}$		
64	Зусманит $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_{13}(\text{Si}_{18}\text{O}_{42})(\text{OH},\text{O})_8$		
65	Кордиерит $\text{Al}_3(\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si}_5\text{AlO}_{18})$		
66	Лейкосфенит $\text{BaNa}_4\text{Ti}_2\text{B}_2\text{Si}_{10}\text{O}_{30}$		
67	Мезолит $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})_38\text{H}_2\text{O}$		
68	Нагролит $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}2\text{H}_2\text{O}$		
69	Турмалин $(\text{Na},\text{Ca})(\text{Mg},\text{Al})_6\text{B}_3\text{Al}_3\text{Si}_6(\text{OH},\text{O})_{30}$		

Изоморфные модификации окиси кремния

Систематизация силикатов Кашаева – Фроловой иллюстрирует четко выраженную склонность слоистых силикатов к изоморфизму. Но даже простейшие соединения кремния имеют несколько изоморфных модификаций.

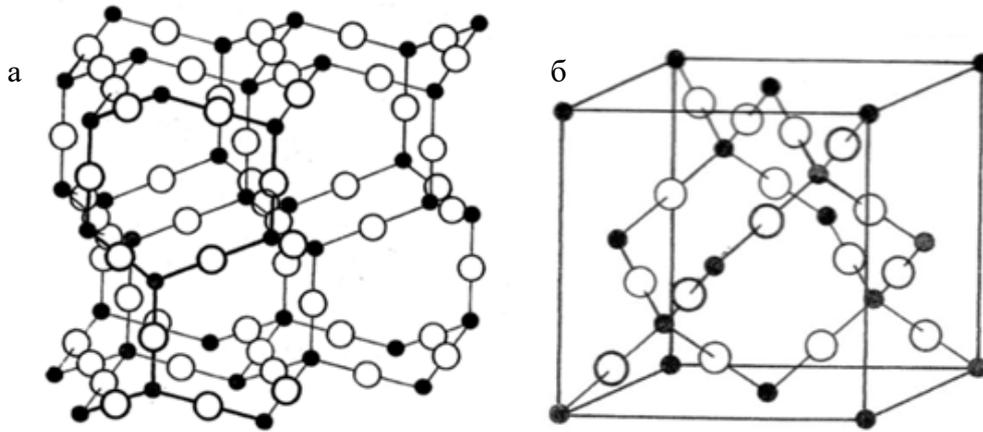
Наиболее известная модификация SiO_2 (кварц) имеет две разновидности (рисунок 4).



а – β -кварц; б – α -кварц

Рисунок 4 – Схемы структур кварца. Показаны только атомы кремния, штриховкой отмечены их высоты

Кроме кварца известны и другие кристаллические разновидности SiO_2 (рисунок 5). Представлены β -разновидности тридимита и кристобалита, которые имеют более упорядоченные структуры по сравнению с α -разновидностями.



а – β -тридимит; б – β -кристобалит; \bigcirc – O; \bullet – Si

Рисунок 5 – Структура β -фаз

Переход из β - в α -модификацию происходит вследствие разворота тетраэдров вокруг оси Si-O-Si β -тридимита.

Атомы кислорода в структурах тридимита и кристобалита создают плотнейшую упаковку ГПУ (вюрцитовый мотив) и ГЦК (сфалеритовый мотив) соответственно. Плотности всех этих разновидностей SiO_2 достаточно близки друг другу по значениям.

Кроме указанных окислов кремния следует упомянуть о таком гидроокисном кремнии как опал. Его химическая формула $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Этот полудрагоценный минерал имеет стеклообразную структуру с ближним порядком [4, 5].

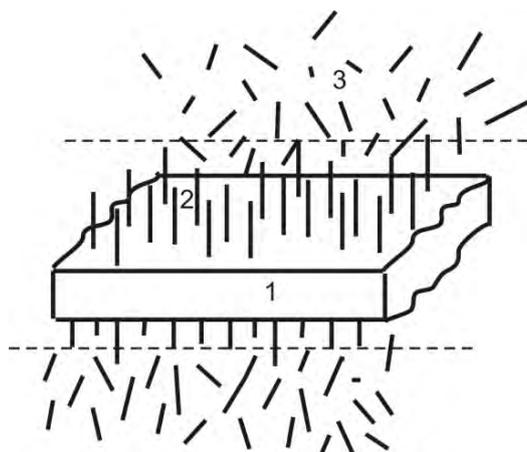
Слоистые силикаты как одномерные наномодификаторы полимерных композиционных материалов

Композиты – это вещества технического назначения. Следовательно, введение частиц другой фазы, отличной от основы, должно либо изменить численное значение параметров матрицы основы, либо придать веществу новое свойство. Весь объем композита включает в себя отдельные области, приведенные на рисунке 6. На этом рисунке показано влияние наночастицы слоистого силиката на взаимориентацию молекул полимера.

Под действием частицы на молекулы вещества основы меняется их взаимодействие, подвижность и взаимориентация. Вблизи поверхности возникает измененный (модифицированный) слой вещества основы 2 (рисунок 6). Между областями 2 и 3 нет резкой границы.

Сумма объемов V_1 и V_2 определяет объем, модифицированный одной частицей наполнителя $W=V_1+V_2$. Суммарный объем W_j ($j = 1, \dots, N$; N – число частиц), отнесенный к объему композита V_C называется степенью модификации:

$$C = \frac{\sum_{j=1} W_j}{V_C}.$$



1 – частица слоистого модификатора; 2 – модифицированный объем; 3 – вещество основы

Рисунок 6 – Область связи между частицей слоистого модификатора и веществом основы

Значение $C \leq 1$, существует оптимальное значение C для каждого композита, при котором эффект модификации достигает максимального значения. При дальнейшем увеличении концентрации частиц композита модифицирующие области влияют друг на друга. При их контакте возникают внутренние напряжения, приводящие к ухудшению качества состава [1].

Модифицирующее действие частицы объясняется рядом причин.

Во-первых, это не скомпенсированные связи молекул поверхностного слоя частиц модификатора, которые позволяют установить достаточно прочное взаимодействие с прилегающими к поверхности частицами молекулы связующего.

Во-вторых, при получении частиц, то есть при диспергировании макрообъектов вследствие флуктуационных процессов нарушается равенство между положительными и отрицательными зарядами частицы. Это особенно ярко проявляется при размерах частиц наполнителя в нанодиапазоне [1].

В поликристаллических металлах при контакте кристаллов с различными уровнями Ферми E_F по нормальным к поверхностям частиц вследствие перехода электронов на частицу с меньшими E_F возникает зарядовая мозаика. Это наиболее ярко проявляется у железа (сталей), так как поверхность Ферми элемента Fe резко отличается от сферической [6].

Модифицирующая активность частиц наполнителя обусловлена наличием на его поверхности активных зарядовых центров (АЗЦ). У слоистых силикатов в их октаэдрическом слое находятся различные гидроксильные группы $(OH)^{-1}$, которые расположены по центрам гексагональных или тригональных лунок, образованных внешними основаниями тетраэдров (рисунок 2). Эти гидроксильные группы могут иметь одинаковые ориентации, что приведет к созданию АЗЦ, формирующих электростатическую мозаику. Эта особенность слоистых силикатов, как показано в работе [7], объясняет долговременное сохранение их электростатичности и делает, в соответствующих условиях, природные слоистые силикаты электрическими аналогами магнитных минералов. Именно поэтому одноименные нанокристаллы слюд и других силикатных минералов являются высокоэффективными наномодификаторами композиционных материалов, например, на основе полимеров [1].

Заключение

Силикатные минералы лежат в основе земной коры, и их количество определяется несколькими десятками названий. Все слоистые силикаты очень склонны к изоморфизму, что обуславливает вариацию их свойств. Не смотря на различие кристаллохимических особенностей, все силикаты включают два основных структурные полиэдра: кремнекислородные тетраэдры и металл-кислородные октаэдры. Из всех имеющихся систем классификации силикатных минералов наиболее адекватной является классификация, разработанная А.А. Кашаевым и Н.А. Фроловой, которая с незначительными дополнениями приведена в статье. Проанализированы полиморфные разновидности природных кристаллов SiO_2 , используемых при получении строительных и машиностроительных композитов.

Получено следующее: наличие электретных свойств слоистых силикатов с учетом других факторов объясняет их высокую модифицирующую активность, которая особенно проявляется в случае использования наночешуек (нанопластинок) с текущей h (толщиной) в наноразмерном диапазоне, то есть одномерных нанокристаллов.

Список использованных источников

1. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
2. **Кашаев, А.А.** Основные типы структур силикатов и их аналогов со сложными тетраэдрическими радикалами – ленточными, слоистыми, каркасными / А.А. Кашаев, Н.А. Фролова. – Иркутск: Иркутский педагогический Институт, 1994. – 25 с.
3. Рентгенография основных типов породообразующих минералов (слоистые и каркасные силикаты) / под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1983. – 213 с.
4. **Брэгг, В.Л.** Кристаллическая структура минералов / В.Л. Брэгг, Г.Ф. Кларингбулл. – М.: Мир, 1967. – 390 с.
5. **Нарай-Сабо, И.** Неорганическая кристаллохимия / И. Нарай-Сабо. – Будапешт: А.Н. Вектгрия, 1969. – 504 с.
6. **Белов, Н.В.** Очерки по структурной минералогии / Н.В. Белов. – М.: Недра, 1976. – 344 с.
7. **Мецик, М.С.** Физика диэлектриков: учеб. пособие / М.С. Мецик, Г.Ю. Гладкий. – Иркутск: Иркутский ун-т, 2001. – 116 с.

Liopo V.A., Auvchinnikov Ye.V., Nikitin A.V., Sitkevich F.A.

Systematization of silicate minerals used in the creation of materials for various purposes

The article considers the causes of appearance of active charge centers on the surface of modifier particles. It is shown that in layered silicates the appearance of such centers is conditioned by their strongly pronounced electronic properties. This fact makes layered silicates high-performance modifiers in the creation of composite materials for various purposes.

Поступила в редакцию 19.12.2014 г.

УДК 621.892.5: 621.89.099.6

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ДЛЯ КОНСИСТЕНТНЫХ ЛИТИЕВЫХ СМАЗОК

Овчинников Е.В.¹, Лиопо В.А.², Струк В.А.², Дьячкова Л.Н.³, Эйсымонт Е.И.²,
Голушко С.Н.⁴

¹Белгородский национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

²Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Беларусь

³Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

⁴ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь

Исследованы структурно-технологические и физико-химические особенности морфологии и активного модифицирующего действия низкоразмерных модификаторов, полученных по различным технологиям. Произведена оценка эксплуатационных характеристик композиционных смазочных материалов по критериям нагрузочной способности, износостойкости и долговечности трибосистем на модельных парах трения, стендах и в процессе натуральных испытаний.

Введение

Современное развитие машиностроительной отрасли требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной несущей способностью и расширенным диапазоном рабочих температур, обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В частности, для негерметичных узлов трения широко применяются пластичные смазочные материалы, обеспечивающие простоту обслуживания данных узлов. Эксплуатационные свойства смазок определяются в основном показателем вязкости и работоспособностью в широком диапазоне температур. С развитием машиностроения повышается интенсивность эксплуатации пар трения, что ведет к увеличению температурных режимов и, как следствие, к вытеканию смазки из узла [1-3].

Анализ исследований, посвященных процессам трения и изнашивания в условиях смазывания, свидетельствует о том, что основными направлениями развития современного фрикционного материаловедения является создание композиционных материалов с заданными свойствами. Выбор модификатора смазочного материала оказывает существенное влияние на фрикционное поведение пары трения. В настоящее время в узлах трения многих машин и механизмов, эксплуатируемых при повышенных и знакопеременных скоростях и нагрузках в различных температурных условиях, применяются смазочные материалы с повышенными требованиями к антифрикционным и противоизносным свойствам, вязкостно-температурной стабильности. Поэтому все большее применение находят смазочные материалы, наполненные многофункциональными присадками.

Эффективным противозадирным и антифрикционным компонентом смазок для тяжелонагруженных узлов трения являются полимеры и металлополимерные частицы, в т.ч. в виде дисперсных волокон, полученных при переработке технологических отходов производства искусственного меха. Доступность и дешевизна сырья позволяют получить эффективные смазки для тяжелонагруженных узлов трения, например, для применения в условиях холодного деформирования металлических заготовок. Использование ультрадисперсных порошков в качестве функциональных добавок к товарным

смазкам представляется перспективным направлением в проблеме повышения эксплуатационных характеристик смазочного материала. Введение в пластичные смазочные материалы низкоразмерных порошков геомодификаторов, ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) приводит к существенным изменениям триботехнических, вязкостных и других эксплуатационных характеристик. Так в работе [4] разработаны составы смазочных материалов на базе отечественного сырья, модифицированных наноструктурными и нанодисперсными частицами органического и неорганического происхождения.

Модифицирование базовых смазок дисперсными частицами кремня и УПТФЭ обеспечивает значительное повышение износостойкости пары трения, что, вероятно, обусловлено формированием адсорбционных слоев олигомера на контактных поверхностях и образованием композиционной структуры с повышенной стойкостью к разрушению и термоокислительной деструкции. Недостатками разработанных композиций является ограниченность по объему производства модификаторов на базе кремня. Перспективным является использование в качестве присадки к смазочным материалам механической смеси дисульфида молибдена и УПТФЭ. Преимуществом данного типа модификатора является достаточно низкая стоимость дисульфида молибдена, широкая распространенность в качестве модифицирующего агента для смазочных материалов. Применение данных смесей позволит комплексно решить задачу по снижению коэффициента трения, созданию разделительного слоя, выдерживающего высокие контактные нагрузки, увеличению стойкости к схватыванию.

Целью данной работы является исследование структуры и физико-механических характеристик композиционных смазочных материалов, модифицированных смесями низкоразмерных модификаторов.

Методика эксперимента

В качестве базовых смазок были использованы многотоннажно выпускаемые пластичные смазки: Литол-24, Итмол-150Н. Базовые смазки производятся в Беларуси и Российской Федерации. При разработке новых присадок и наполнителей, а также для их сравнения с ранее известными антифрикционными добавками в процессе исследований были использованы следующие материалы: дисульфид молибдена, УПТФЭ, а также их смеси. Содержание нанопазы в модификаторе не превышало 5 мас. %. Размер агломератов порошкообразного низкоразмерного модификатора составлял 5-20 мкм.

Для проведения триботехнических испытаний на машинах FT-2 (шарик и пластина) были изготовлены образцы из сталей ШХ15 (HRC 60) и Ст45 (HRC 48-50). Шероховатость рабочих поверхностей перед испытаниями не превышала значение $R_a = 0,3-0,4$ мкм. Состояние поверхности трения, топографию разделительного слоя, структуру присадок и наполнителей изучали на растровом электронном микроскопе TescanMira (Чехия) и атомном силовом микроскопе NT 206 (Беларусь) по методикам ОДО «Микротестмашины». Визуализацию изображений осуществляли с помощью оригинальных пакетов в операционной системе «Windows».

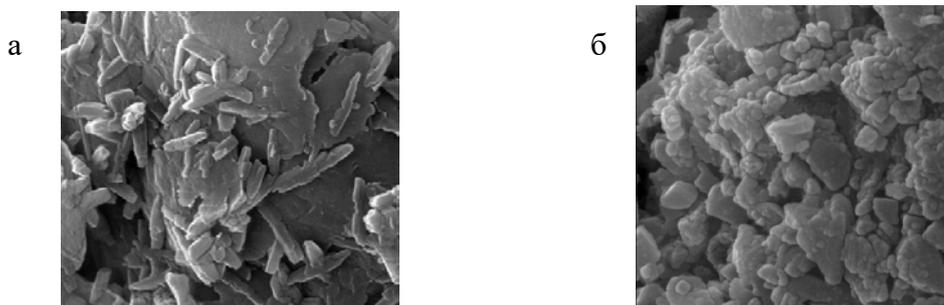
Реологические характеристики образцов определялась на реовискозиметре Гепплера при $T = 303 \pm 2$ К. Активность низкоразмерных модификаторов оценивали методом термостимулированной деполяризации по регистрации термостимулированных токов (ТСТ). Для оценки токов ТСТ использовали оригинальную установку ST-1 (ОДО «Микротестмашины»).

Результаты исследований

Достаточно широко в качестве модифицирующего агента для пластичных смазок применяется дисульфид молибдена. Применение дисульфида молибдена в качестве присадок к смазочным материалам предложено в работах [5-9]. При температурах трибоконтакта в зоне трения химически активные компоненты присадок взаимодействуют с поверхностью металла и образуют разделительную пленку, выдерживающую высокие контактные нагрузки. В результате данного процесса трение материалов пары металл-металл фактически локализуется в поверхностных модифицированных слоях, вследствие чего, почти полностью исключается взаимодействие ювенильных поверхностей металлов, приводящих к задирам, прижогам, схватыванию и т.п.

Дисульфид молибдена в качестве антифрикционного материала было предложено применять более 250 лет назад. Однако только 50 лет назад была получена возможность его синтеза в химически чистом состоянии в больших количествах, что и позволило его применять в качестве антифрикционного материала и модификатора как в смазочных материалах, так и полимерах. Наличие примесей в соединении MoS_2 увеличивает абразивные свойства и коэффициент трения. Триботехнические характеристики дисульфида молибдена объясняются строением его кристаллической решетки, которая существует в двух полиморфных состояниях: гексагональная ($a = 0,316$ нм, $c = 1,229$ нм, пространственная группа $R6_3/mmc$) и ромбоэдрическая (для гексагональной установки $a = 0,3164$ нм, $c = 1,839$ нм). Кристаллические структуры обеих форм состоят из слоев атомов Мо, располагающихся между плотноупакованными слоями из атомов серы S. Таким образом, слой атомов молибдена покрыт с двух сторон слоями серы. Между атомами серы и молибдена действуют ковалентные связи, однако между слоями серы действуют слабые силы, что обеспечивает низкие тангенциальные напряжения при перемещении одного слоя относительно другого.

На рисунке 1 приведена морфология кристаллов дисульфида молибдена, из которых видна слоистая структура данного химического соединения. Из полученных данных видно, что в порошковых материалах дисульфида молибдена присутствуют частицы нанометрового диапазона. Проведенные исследования по изучению распределения дисперсности показали, что содержание частиц, находящихся в нанометровом диапазоне, составляет достаточно значимую долю от количества всех частиц (рисунки 2-5).



а $\times 14000$; б $\times 28000$

Рисунок 1 – Морфология кристаллов дисульфида молибдена

Проведенный фракционный анализ с применением растровой электронной микроскопии показал наличие большого количества низкоразмерных частиц дисульфида молибдена в исследуемых образцах: процентное содержание по параметру «количество» ~ 95 % (рисунок 2). Однако по параметру «масса» в исследуемом образце содержание низкоразмерных частиц составляет не более 23 % (рисунок 3).

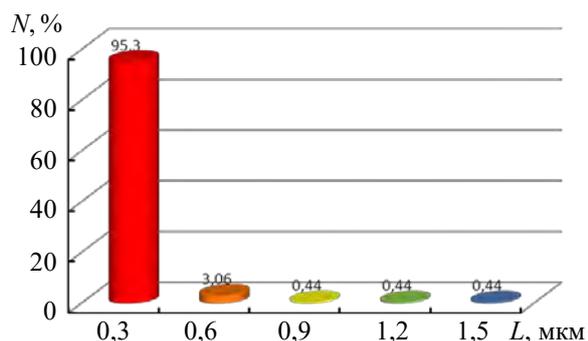


Рисунок 2 – Распределение частиц дисульфида молибдена по «количеству» N в зависимости от геометрических размеров в исследуемом образце (рисунок 1б)

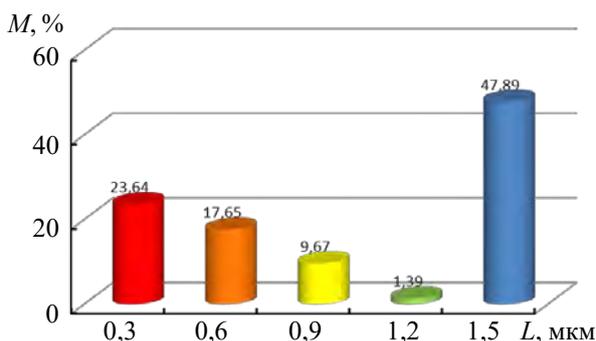


Рисунок 3 – Распределение частиц дисульфида молибдена по «массе» M в зависимости от геометрических размеров в исследуемом образце (рисунок 1б)

Распределение частиц MoS_2 в области размеров менее 0,3 мкм показано на рисунках 4, 5.

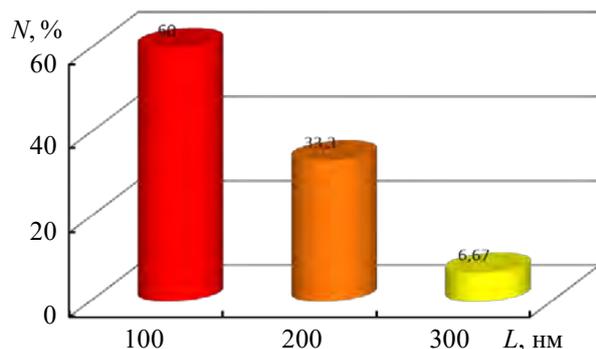


Рисунок 4 – Распределение частиц дисульфида молибдена по «количеству» в зависимости от геометрических размеров в исследуемом образце (рисунок 1б)

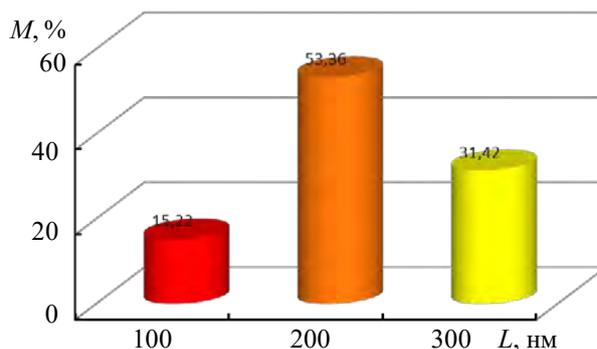


Рисунок 5 – Распределение частиц дисульфида молибдена по «массе» в зависимости от геометрических размеров в исследуемом образце (рисунок 1б)

Таким образом, показано наличие в стандартных порошковых образцах дисульфида молибдена низкоразмерной фазы, которая оказывает существенное влияние на физико-химические характеристики MoS_2 , а также эксплуатационные параметры модифицируемых данным соединением материалов.

Проведенные исследования по изучению зарядовой активности порошковых материалов дисульфида молибдена методом термостимулированной токовой спектроскопии показали наличие нескомпенсированного заряда в области температур 291-313 К. Наличие данного заряда должно обуславливать модифицирующую активность модификаторов на базе дисульфида молибдена (рисунок 6).

В настоящее время широкое распространение в качестве модифицирующего агента для полимерных и смазочных материалов получил материал на базе политетрафторэтилена – УПТФЭ.

Неравновесное исходное строение частиц ПТФЭ, приводящее к формированию неравновесной структуры блоков при традиционной технологии монолитизации, обуславливает характерные особенности морфологии получаемого при термогазодинамическом синтезе (ТГД-синтезе) продукта (рисунок 7).

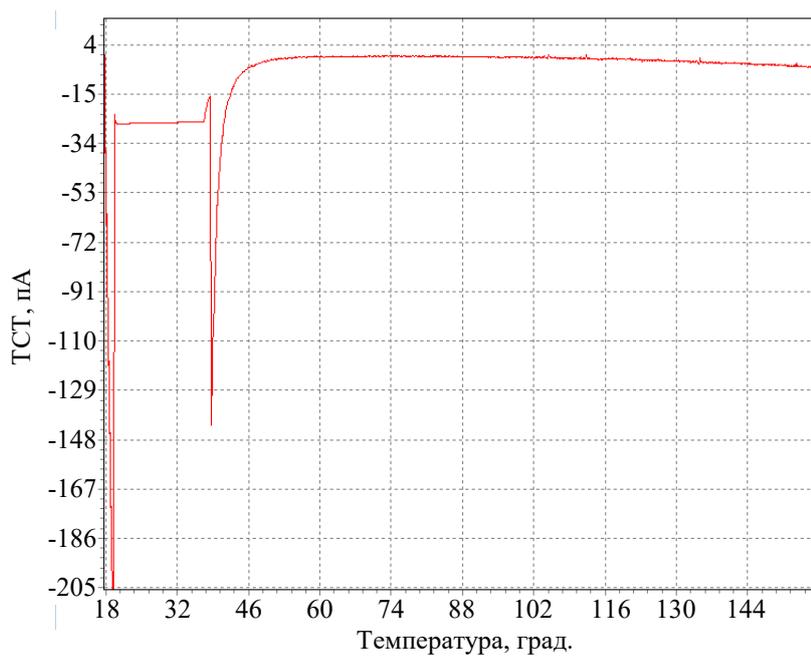


Рисунок 6 – ТСТ-спектр дисульфида молибдена

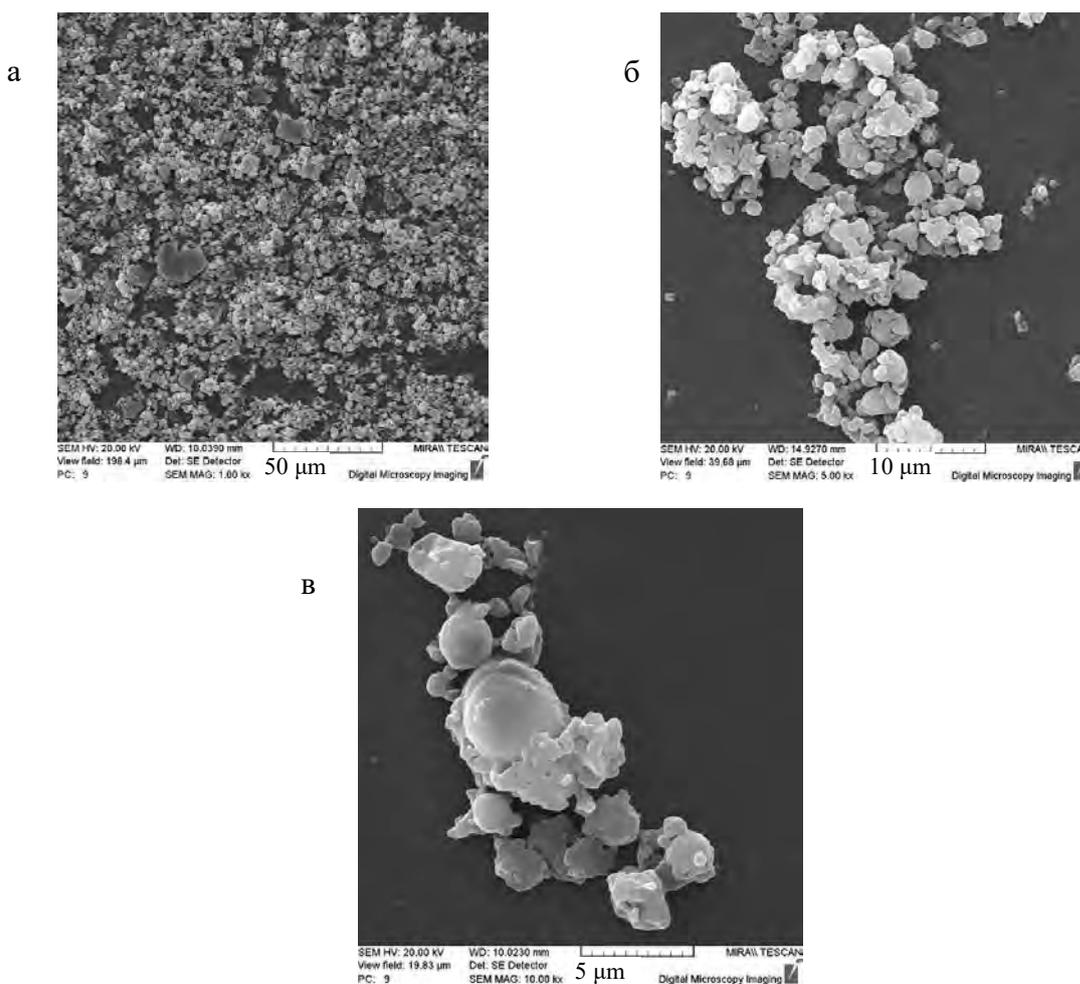
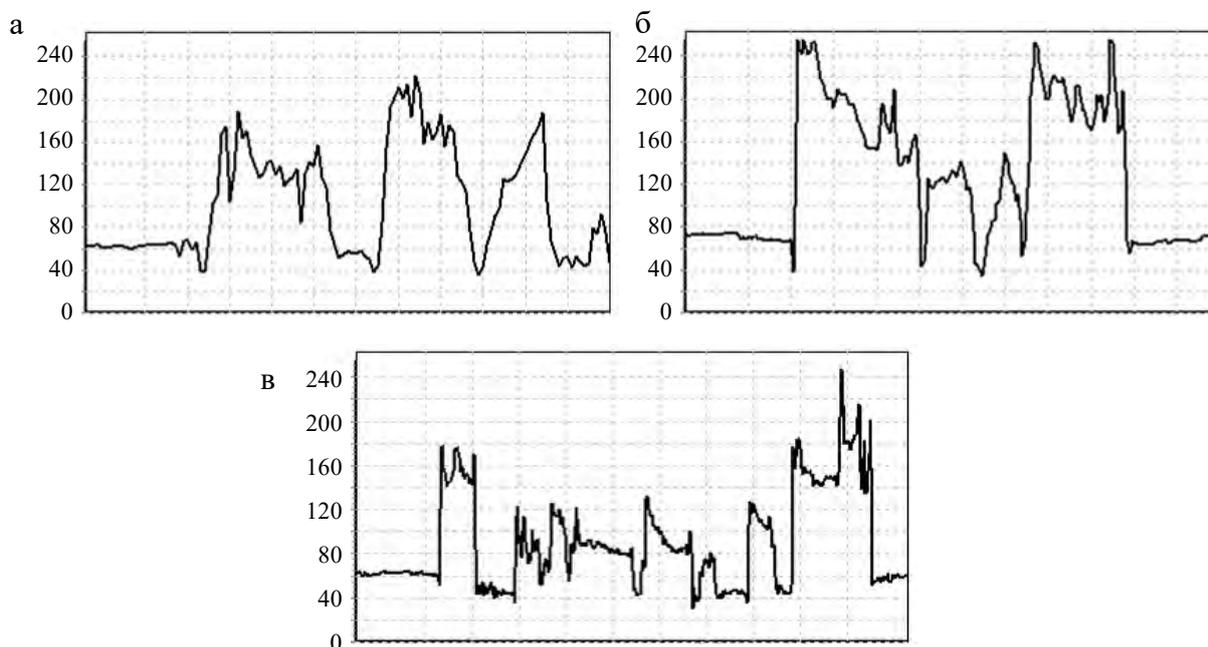


Рисунок 7 – Морфология ультрадисперсных кластеров ПТФЭ. Фотографии частиц получены методом растровой электронной микроскопии

УПТФЭ представляет собой набор кластерных образований из частиц различного габитуса и, очевидно, разной молекулярной массы. В структуре можно выделить выраженные сферические образования с размером 0,5-5,0 мкм и ламелярным габитусом с размерами от 0,5 мкм до 5-10 мкм. Вероятно, образование таких структур обусловлено вторичными процессами обработки получаемого порошкообразного продукта, которые приводят к агрегации первичных частиц под действием сдвиговых напряжений при сепарации и перемешивании исходного полуфабриката.

Полифракционность и полимолекулярность продуктов ТГД-синтеза ПТФЭ обуславливают возможность формирования структуры нанокompозитов с различным уровнем молекулярного упорядочения.

Проведен фракционный анализ для ультрадисперсных частиц ПТФЭ, результаты которого представлены на рисунках 8-10.



а – данные для образца, представленного на рисунке 7а; б – данные для образца, представленного на рисунке 7б; в – данные для образца, представленного на рисунке 7в

Рисунок 8 – Топография поверхности частиц УПТФЭ

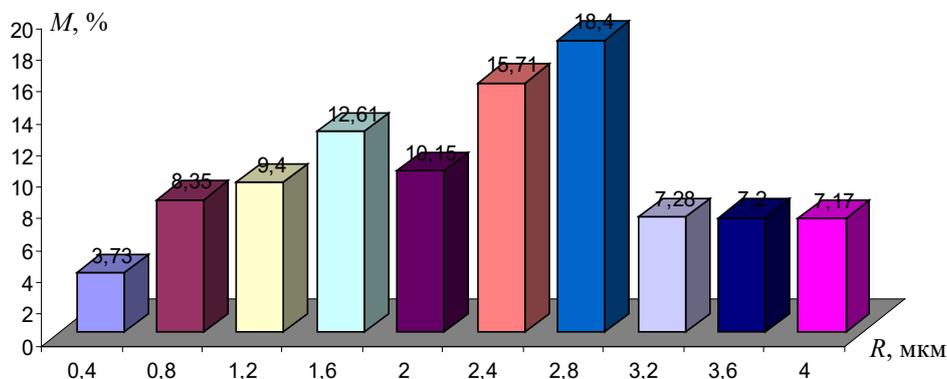


Рисунок 9 – Зависимость массовой доли ультрадисперсных частиц ПТФЭ в исследуемой пробе от размера частиц УПТФЭ. Расчет проводился для образца, представленного на рисунке 7в

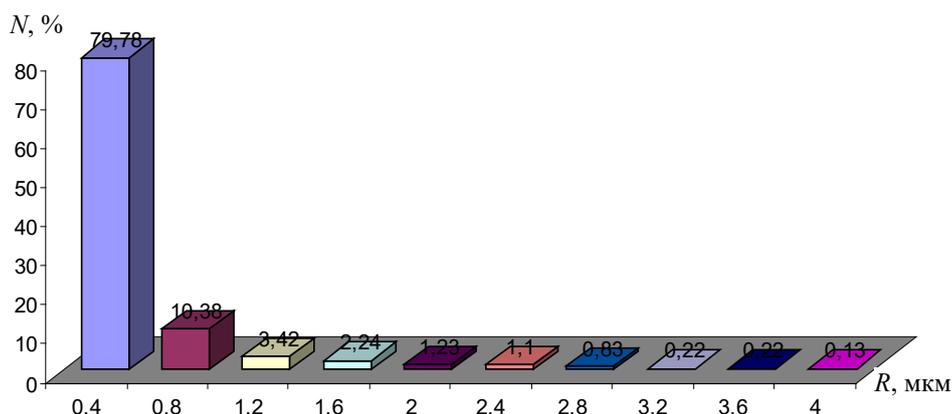


Рисунок 10 – Зависимость количества ультрадисперсных частиц ПТФЭ в исследуемой пробе от размера частиц УПТФЭ. Расчет проводился для образца, представленного на рисунке 7в

Согласно данным, полученным методом растровой электронной микроскопии, независимо от размера частиц в исследуемых пробах преобладающим по количеству являются мелкодисперсные частицы (рисунок 8-10). В массовом отношении при использовании данной технологии получения материала преобладающими являются частицы с большими геометрическими параметрами в исследуемом диапазоне линейных размеров. Данный характер дисперсионного состава по количеству и размерам сохраняется для всех диапазонов увеличений, при которых рассматривались частицы. При рассмотрении параметров массовой доли и количества частиц в зависимости от фактора формы наблюдается существенное изменение значений данных характеристик в зависимости от диапазона размеров исследуемых частиц.

О полифракционном составе частиц УПТФЭ свидетельствуют результаты ДТА (рисунок 11), ТСТ-спектроскопии (рисунок 12).

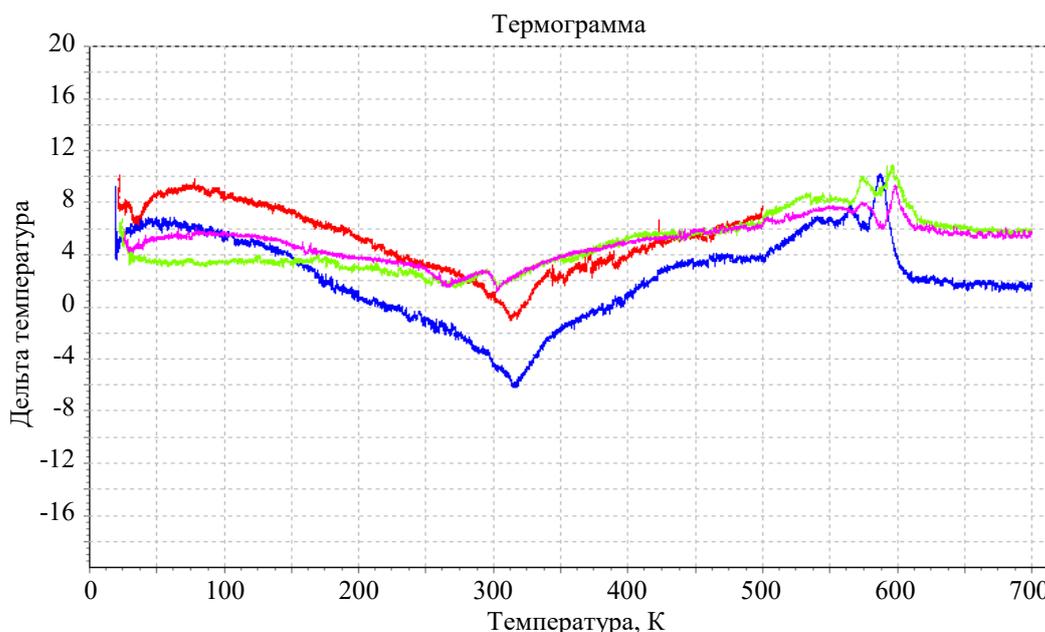


Рисунок 11 – Кривые ДТА различных проб промышленных продуктов ТГД-синтеза «Форум»

Наличие эндоэффектов при температурах 333-475 К обусловлено процессами плавления и сублимации полимерных фракций различной молекулярной массы, которые при термическом воздействии удаляются из материала и выявляют фрагменты полимерных термически устойчивых фракций (рисунок 11). Таким образом, частицы УПТФЭ представляют собой нанофазные структуры, состоящие из полимерного ядра и олигомерного окружения, полученные по разработанным промышленным технологиям [10].

Неравновесное строение продуктов ТГД-синтеза ПТФЭ подтверждают и данные ТСТ- и ЭПР-спектроскопии, которые свидетельствуют о наличии у частиц УПТФЭ некомпенсированного заряда (рисунок 12).

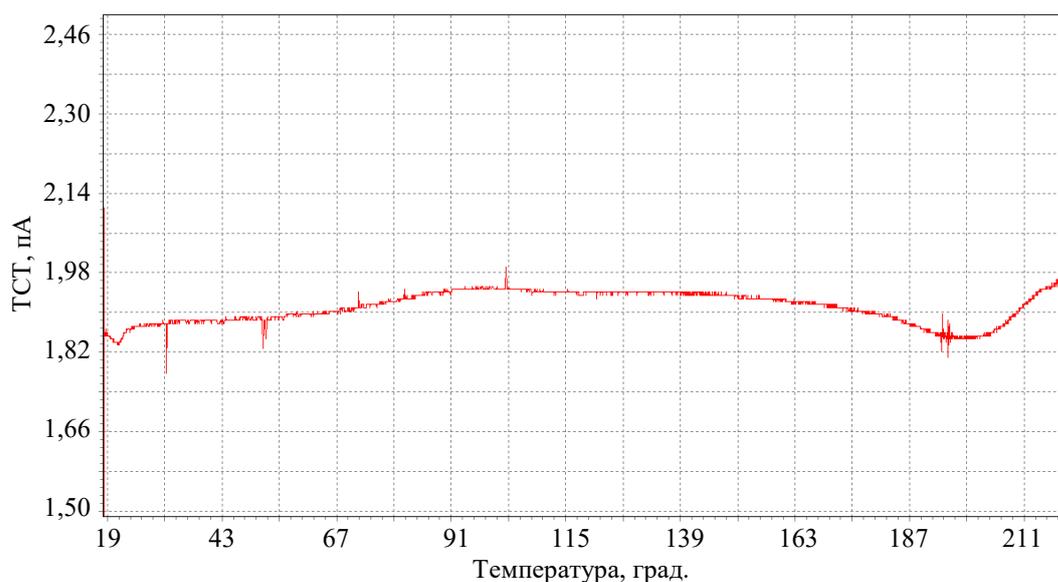


Рисунок 12 – ТСТ-спектр УПТФЭ

Из полученных результатов видно, что введение дисульфида молибдена в пластичную смазку Литол-24 приводит к существенному загущающему эффекту (рисунки 13, 14).

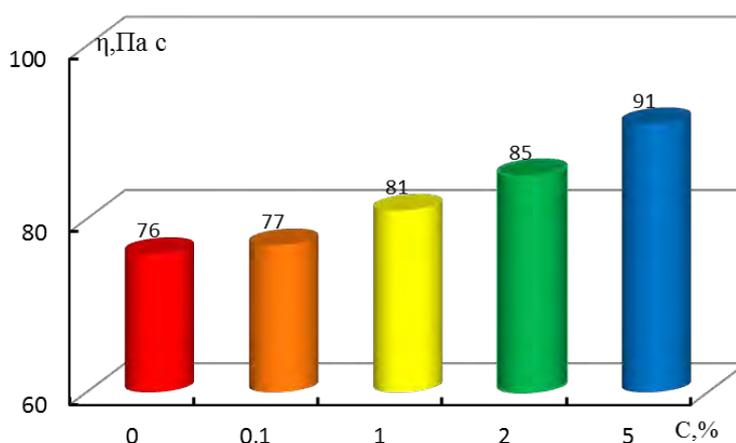


Рисунок 13 – Зависимость динамической вязкости смазки η Литол-24 от содержания C УПТФЭ

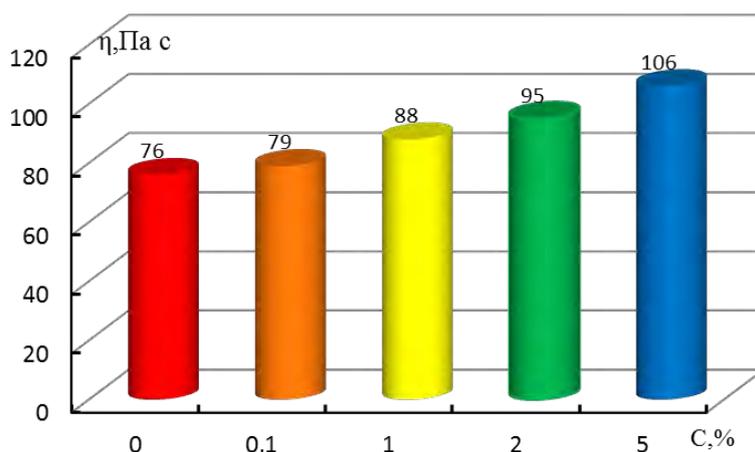


Рисунок 14 – Зависимость динамической вязкости смазки Литол-24 от содержания нанодисперсного дисульфида молибдена

Для композиций на базе Литол-24 и УПТФЭ зависимость увеличения вязкости с возрастанием концентрации модификатора не носит такой экстремальный характер. Таким образом, применение смеси модификаторов должно приводить к стабилизации вязкостных характеристик модифицируемых пластичных смазок. На рисунке 15 представлена зависимость динамической вязкости пластичной смазки Литол-24 от концентрации механической смеси модификаторов УПТФЭ (50 мас. %) – дисульфид молибдена (50 мас. %).

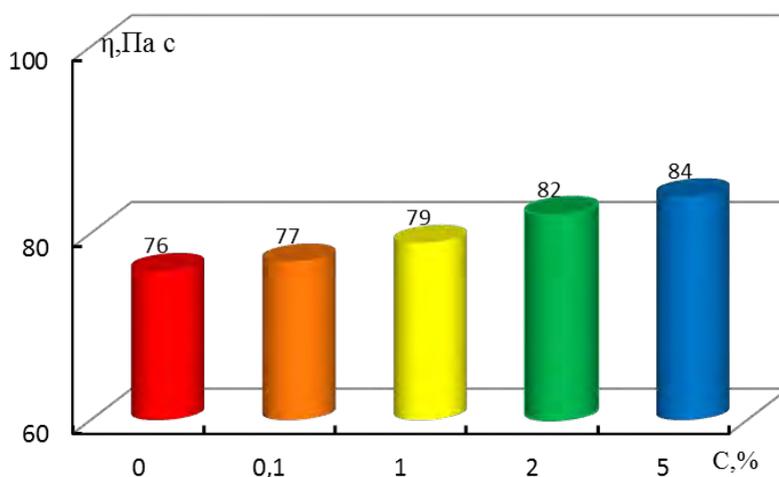


Рисунок 15 – Зависимость динамической вязкости смазки Литол-24 от содержания композиционного модификатора УПТФЭ (50 мас. %) – дисульфид молибдена (50 мас. %)

Стабилизация в вязкостных характеристиках пластичных смазок при модифицировании механической смесью УПТФЭ - MoS_2 , скорее всего, объясняется взаимодействием частиц модификаторов между собой за счет вандерваальсовых сил притяжения. Взаимодействуя между собой, частицы модификаторов ослабляют структурирующее действие на смазочную матрицу и, как следствие, уменьшаются значения вязкостных характеристик модифицированных пластичных смазок. Данный эффект изменения реологических характеристик характерен и для отечественных пластичных литиевых смазок, в частности, для Иمول-150Н (рисунки 16-18).

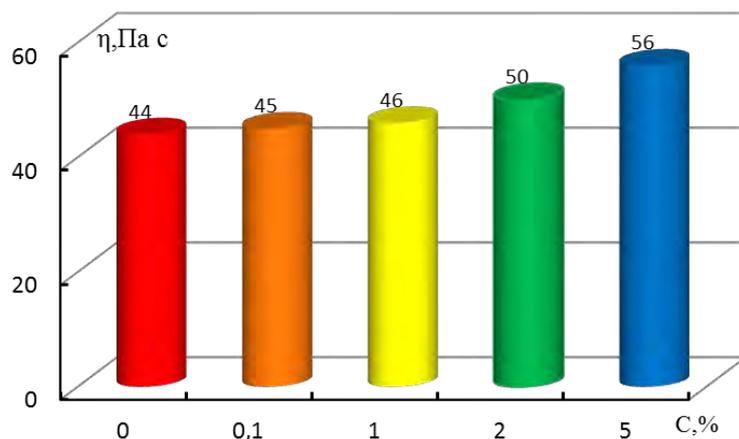


Рисунок 16 – Зависимость динамической вязкости смазки Итмол-150Н от содержания УПТФЭ

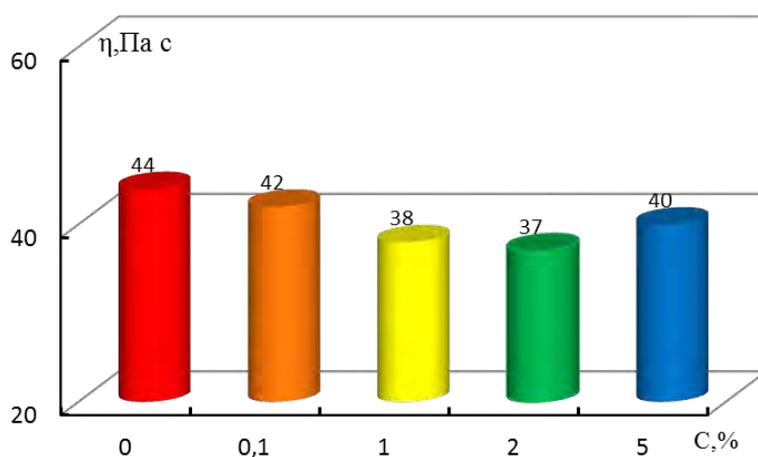


Рисунок 17 – Зависимость динамической вязкости смазки Итмол-150Н от содержания нанодисперсного дисульфида молибдена

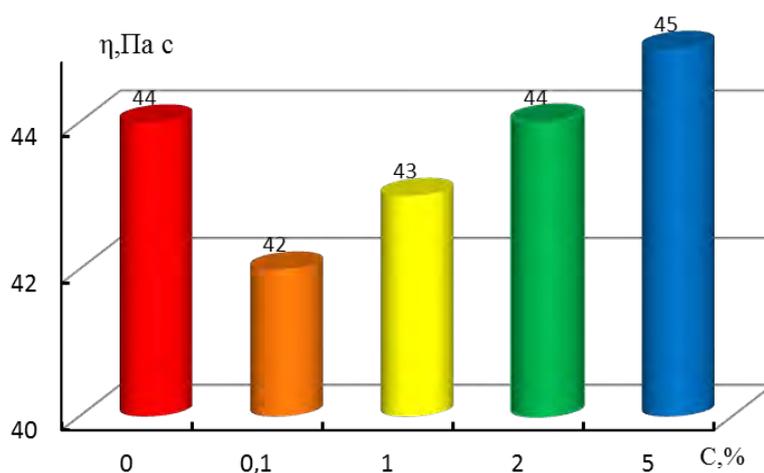
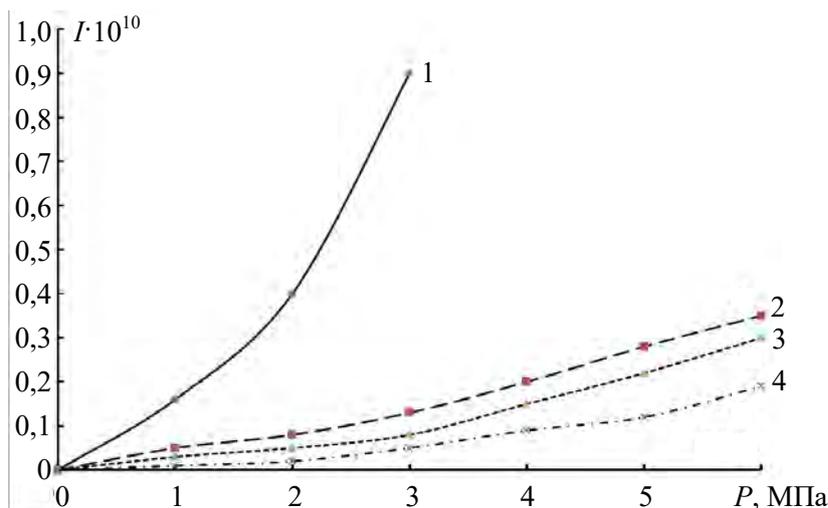


Рисунок 18 – Зависимость динамической вязкости смазки Итмол-150Н от содержания композиционного модификатора УПТФЭ (50 мас. %) – дисульфид молибдена (50 мас. %)

Наблюдаемые структурные и реологические изменения сказываются на трибо-технических характеристиках исследуемых пластичных смазочных материалов. Прове-

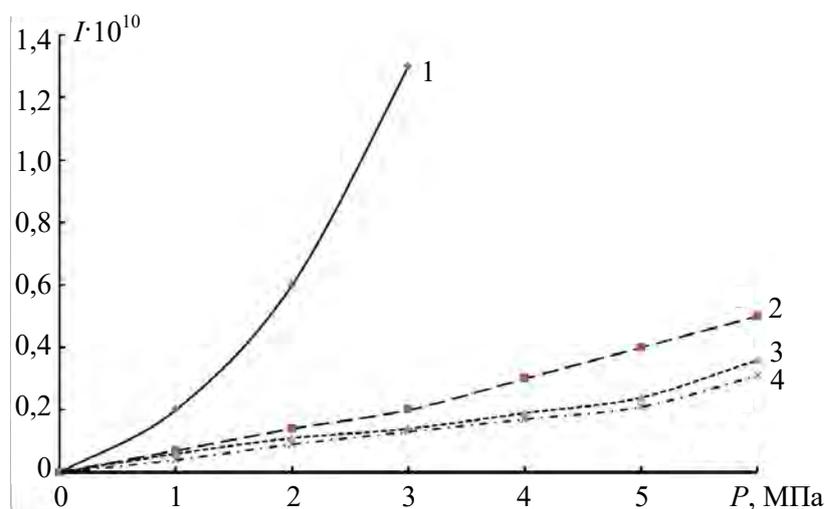
денные исследования по определению значений коэффициента трения и интенсивности изнашивания металлополимерных пар трения показали существенное снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания при применении низкоразмерных модификаторов и их смесей.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что введение наномодификаторов различного состава (УПТФЭ, дисульфида молибдена, механической смеси частиц УПТФЭ – дисульфид молибдена) в базовые смазки (Литол-24, Итмол-150Н) снижает интенсивность изнашивания пар трения в 3-10 раз и расширяет ее нагрузочно-скоростной диапазон в 2-3 раза (рисунки 19, 20, таблица).



1 – при смазывании смазкой Литол-24; 2 – Литол-24 + 2 мас. % УПТФЭ;
3 – Литол-24 + 2 мас. % дисульфид молибдена; 4 – Литол-24 + 2 мас. % механической смеси
УПТФЭ (50 мас. %) + MoS_2 (50 мас. %)

Рисунок 19 – Зависимость интенсивности изнашивания I от нагрузки P пары ШХ15 – сталь 45



1 – при смазывании смазкой Итмол-150Н; 2 – Итмол-150Н + 2 мас. % УПТФЭ;
3 – Итмол-150Н + 2 мас. % дисульфид молибдена; 4 – Итмол-150Н Литол-24 + 2 мас. %
механической смеси УПТФЭ (50 мас. %) + MoS_2 (50 мас. %)

Рисунок 20 – Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки пары ШХ15 – сталь 45

Таблица – Триботехнические характеристики модифицированных смазок на основе Литол-24 и Итмол-150Н

Состав смазки	Рабочий диапазон смазки по удельной нагрузке, МПа	Коэффициент трения f в рабочем диапазоне смазки, max	Диапазон стабилизации температуры в зоне контакта по удельной нагрузке, МПа
Литол-24	5÷62	0,15	12÷57
Литол-24 + 2 мас. % УПТФЭ	5÷68	0,13	12÷55
Литол-24 + 2 мас. % MoS ₂	5÷62	0,15	12÷60
Литол-24 + 2 мас. % (УПТФЭ (50 мас. %) + MoS ₂ (50 мас. %))	5÷70	0,13	12÷60
Итмол-150Н	5÷61	0,17	14÷55
Итмол-150Н + 2 мас. % УПТФЭ	5÷62	0,14	14÷56
Итмол-150Н + 2 мас. % MoS ₂	5÷66	0,17	14÷57
Итмол-150Н + 2 мас. % (УПТФЭ (50 мас. %) + MoS ₂ (50 мас. %))	5÷68	0,14	13÷57

Наиболее вероятным механизмом противоизносного действия данного типа модификаторов является то, что данные материалы обладают собственным зарядом q , величина которого является функцией размера a [11, 12]. Зависимость заряда частиц q от их размера a предложено описывать выражением:

$$q = 4\pi\epsilon_0\epsilon\varphi_0\left(\frac{a}{e}\right)^{\frac{1}{\lambda}},$$

где λ – радиус дебаевского экранирования;

ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ – диэлектрическая проницаемость;

φ_0 – потенциал выхода.

Причиной возникновения заряда у дисперсных частиц являются несовершенства строения, особенности получения (детонационный синтез, термолиз) или влияние внешних факторов – трибоактивация, триборазрушение и т.п. Наличие собственного заряда у частиц модификатора обуславливает протекание в среде смазки различных электрофизических процессов, оказывающих существенное влияние на ее структуру. Воздействие силового поля наночастицы приводит к формированию ориентированного слоя диэлектрической компоненты смазки [12]. Величина этого слоя определяется величиной заряда низкоразмерного модификатора и особенностями строения молекул смазки.

Заключение

Установлено, что частицы дисульфида молибдена, применяемого для модифицирования исследуемых пластичных смазок, содержат низкоразмерные фракции, получаемые в результате синтеза данного материала. Концентрация наноразмерных частиц в MoS₂ должна существенным образом определять модифицирующее действие в полимерной матрице. Для частиц MoS₂ в низкотемпературной области установлено наличие

долговременно существующего электретенного заряда. Применение механической смеси УПТФЭ – дисульфид молибдена для модифицирования литиевых пластичных смазок снижает интенсивность изнашивания пар терния в 3-10 раз и расширяет ее нагрузочно-скоростной диапазон в 2-3 раза, что обусловлено наличием собственного некомпенсированного заряда у веществ, составляющих данную механическую смесь.

Список использованных источников

1. **Буяновский, И.А.** Физико-химические аспекты смазочного действия (к 90-летию профессора Г.И. Фукса) / И.А. Буяновский, И.Г. Фукс // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 227-233.
2. **Ищук, Ю.Я.** Технология пластичных смазок / Ю.Я. Ищук. – Киев: Наукова думка, 1986. – 248 с.
3. **Фукс, И.Г.** Добавки к пластичным смазкам / И.Г. Фукс. – М.: Химия, 1982. – 248 с.
4. Нанокпозиционные смазочные материалы / Е.В. Овчинников [и др.] // Горная механика и машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 89-94.
5. Состав и свойства пластичных смазок / В.Е. Вайншток [и др.]. – М.: ЦНИИТонефтехимия, 1978. – С. 86.
6. **Папок, К.К.** Химмотология топлив и смазочных масел / К.К. Папок. – М.: Воениздат, 1981. – 218 с.
7. Методы оценки противоизносных и противозадирных свойств смазочных материалов / И.Н. Цуркан [и др.]. – М.: Наука, 1969. – С. 201-207.
8. **Валенкин, А.В.** Масла для шестеренчатых передач / А.В. Валенкин. – М.: Химия, 1982. – 248 с.
9. Влияние полимерных присадок на прочность литевых смазок / В.В. Самгина [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1976. – № 11. – С. 7-8.
10. Фторсодержащие ингибиторы изнашивания металлополимерных трибосистем / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Струка. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 270 с.
11. **Коробко, Е.В.** Электроструктурированные (электрореологические) жидкости: особенности гидромеханики и возможности использования / Е.В. Коробко. – Минск: АНК «ИТМО им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси, 1996. – 189 с.
12. **Рычков, Ю.М.** Прикладная электродинамика / Ю.М. Рычков. – Гродно: ГрГУ, 1998. – 171 с.

Auvchinnikau Ye.V., Liopo V.A., Struk V.A., Dyachkova L.N., Eisymont Ye.I., Golushko S.N.

Nanomodifiers for consistent lubricants

The paper deals with structural-technological and physical-chemical peculiarities of morphology and active modifying action of nanomodifiers obtained using various technologies. Operational characteristics of composite lubricating materials are estimated according to the criteria of load capacity, wear resistance and durability of tribosystems on modal friction pairs, stands and in the process of verification nature tests.

Поступила в редакцию 19.01.2015 г.

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

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.
 2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, научная новизна.
 3. Статья должна быть представлена в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Microsoft Word (97-2010). Шрифт текста Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1.
 4. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии авторов, наименования организаций, в которых работают авторы. Статья должна содержать: аннотацию (до 10 строк), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. Аннотация и название статьи, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.
 5. Рисунки должны быть четкими и созданы в одном из графических редакторов (формат jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), графики присоединены с помощью табличного процессора «Excel» или «MS Graph» (встроенного в «Word»). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы.
 6. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Формулы должны быть созданы в редакторе «Math Type».
 7. Обозначения, приведенные в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.
 8. Размерность всех величин, приведенных в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых. Для обозначения физических величин используется курсивный шрифт, для математических символов типа \cos , \max , критериев вида Nu , Re и т.п., чисел, химических символов – прямой шрифт. Для русских и латинских букв в индексах используется прямой шрифт, если они не относятся к обозначениям физических величин, а являются сокращением слова, курсив – если принимают последовательные значения или служат для перечисления чего-либо, обозначения ряда чисел и т.п.
 9. Список использованных источников должен быть приведен в конце статьи и содержать полные библиографические данные. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.
 10. Авторам необходимо на отдельной странице предоставить о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, почтовый адрес для переписки, место работы и занимаемая должность, а также номера телефонов, факсимильной и электронной связи.
1. The feature material should correspond to the magazine's profile and should be expounded very understandable.
 2. The articles provided to the magazine editorial staff are reviewed. The main criteria of publishing feasibility are subjects' urgency and scientific novelty.
 3. The article should be presented in printed out and electronic form in the Microsoft Word format (97-2010). The body text is Times New Roman, size 12, interval – 1.
 4. The UDC number, article's title, authors' surnames, names of organizations where the authors work should be stated in the article. The article should contain annotation (till 10 lines), introduction, the basic part, the conclusion finished by accurately formulated consequences, and as well as the list of the used sources. The annotation, the article's title and as well as the authors' surnames should be presented in English and Russian languages.
 5. The pictures should be well-defined and should be created in one of the graphic editors (format jpg, tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd); in this case they are attached with tabular based processor Excel or MS Graph (built-in Word). All symbols in the figures should be deciphered.
 6. The tables are placed directly in the text of the article. Each table should have the title. All tables and diagrams should have references in the text. Formulae should be done by «Math Type» editing program.
 7. Symbols used in the article are deciphered directly in the text; in addition they could be taken out on a separate page.
 8. Dimension of all sizes accepted in the article should correspond to the International System of Units (SI). The abbreviations except for the standards should not be used. Designations of physical quantities are given by Italic characters. Mathematical symbols such as \cos , \max , criteria of kind Nu , Re , etc., numbers, chemical symbols are given by Roman characters. Russian and Latin letters in indexes are given by Roman characters if they do not refer to designations of physical quantities and are word abbreviations, they are given by Italics if they accept successive values or serve for enumeration of something, sequence designation, etc.
 9. The list of the used sources should be given at the end of the article and contain full bibliographic data. The list should be made in the order as the references are mentioned in the text. The references to the unpublished works are not allowed.
 10. The authors should provide the following information on a separate page: surname, given name, patronymic name, and postal address for correspondence, place of employment and work status; as well as phone numbers, fax number, and e-mail address.

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

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

Адрес редакции:

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

ISSN 1728-3841



9 771728 384000

Телефоны:

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

(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь

E-mail: ontipr@tut.by

<http://www.sipr.by>