

ISSN 1728-3841

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ 2016 №3



2016 № 3

ГОРНАЯ МЕХАНИКА
И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2016

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.
Выходит четыре раза в год

Редакция:

Главный редактор
Щерба Владимир Яковлевич

Заместитель главного редактора
Прушак Виктор Яковлевич

Технический редактор
Барановский Анатолий Леонидович

Ответственный секретарь
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.
Березовский Н.И. – доктор технических наук, проф.
Петровский Б.И. – доктор технических наук

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

**Адрес редакции:**

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

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

© ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

- Журавков М.А., Кологривко А.А., Коновалов О.Л., Галузо О.Г., Романов Д.В.** Оценка геоэкологической безопасности эксплуатации противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки шламохранилища калийного производства в условиях прогнозируемого воздействия нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами 5
- Гец А.К., Оника С.Г., Халывкин Ф.Г.** Имитационное моделирование процессов горного производства 22
- Липницкий Н.А., Усенко В.С., Ильин Д.А.** Пример использования программного комплекса Examine 2D для геомеханических расчетов 26
- Кацемба С.Н., Злебова А.Е., Воронцова И.В., Иванов Д.Л.** Гидрогеологическая изученность мезо-кайнозойских и палеозойских отложений Северного участка Петриковского месторождения калийных солей 35

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Довгалев А.М., Тарадейко И.А.** Совмещенное магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности нежестких гидроцилиндров горно-шахтного оборудования 45
- Ищенко М.В., Кондратчик Н.Ю.** Изнашивание роликов валкового прессы с рельефной рабочей поверхностью 56
- Прушак В.Я., Данилов В.А., Кондратчик Н.Ю.** Пути совершенствования прессового оборудования калийного производства 61
- Зильберглейт М.А.** Производители валковых прессов для гранулирования (брикетирования). Обзор 1. США 69
- Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Лютко Г.И.** Передача потока энергии посредством трения между барабаном (шківом) и лентой (ремнем). Часть 2. Общий баланс мощности 77
- Прушак В.Я., Щерба Е.В., Кондратчик Н.Ю., Волчек О.М.** Конструктивные пути повышения эффективности прессования хлористого калия 82

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Антонов А.С., Ищенко М.В., Бурцев А.Н., Струк В.А.** Композиционные материалы на основе смесей термопластов 87

На обложке: агрегат для ремонта нефтяных и газовых скважин АПР-50/60.

На 1-й стр.: подъемная машина МППП-21.

На 3-й стр.: обработка барабана на станке WRD-150.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

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

Подписано в печать 29.08.2016 г.

Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 2262. Усл. печ. л. 11,67. 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.

MINING MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 3 2016

Founder of the Journal:

JSC “Soligorsk Institute of Resource
Saving Problems
with Experimental Works”

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998
Issued four times a year

Edition:

Editor-in-Chief
Shcherba Vladimir Yakovlevich

Editor-in-Chief Deputy
Prushak Viktor Yakovlevich

Technical Editor
Baranovsky Anatoly Leonidovich

Executive Secretary
Zayats Irina Mikhailovna

Editorial Board:

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

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



Editorial Address:

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

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

© JSC “Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Experimental Works” 2016

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Zhuravkov M.A., Kologrivko A.A., Konovalov O.L., Galuzo O.G., Romanov D.V. Geoecological safety assessment of the impervious screen exploitation from sludge depository polyethylene film of potash production in the foreseeable load action conditions from sludge and deformations of undermining mining operations	5
Gets A.K., Onika S.G., Khalyavkin F.G. Simulation modeling of mining operations	22
Lipnitsky N.A., Usenko V.S., Ilyin D.A. An example use of Examine 2D software system for geomechanics calculations	26
Katsemba S.N., Zlebova A.E., Vorontsova I.V., Ivanov D.L. State of knowledge of hydrogeology of Mesozoic, Cenozoic and Paleozoic deposits at Northern section of Petrikov deposit of potash salt	35

MACHINE-BUILDING

Dovgalev A.M., Taradeiko I.A. Combined magnetic dynamic hardening of internal surface of the non-rigid hydraulic cylinders of mining equipment	45
Ishchenko M.V., Kondratchik N.Yu. Wear of rollers of a roller press with relief working surface	56
Prushak V.Ya., Danilov V.A., Kondratchik N.Yu. Ways of improving the pressure equipment of potash production	61
Zilbergleit M.A. Manufacturers of roller presses for granulation (briquetting). Review 1. The USA	69
Kazachenko G.V., Basalai R.A., Lyutko G.I. Energy flow transmission through friction between a drum (pulley) and a belt (strap). Part 2. Overall power balance	77
Prushak V.Ya., Shcherba Ye.V., Kondratchik N.Yu., Volchek O.M. Constructive ways of efficiency upgrading of potassium chloride compacting	82

MATERIALS ENGINEERING

Antonov A.S., Ishchenko M.V., Burtsev A.N., Struck V.A. Composite materials based on thermoplastic blends	87
--	----

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622:504.55

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКИ ШЛАМОХРАНИЛИЩА КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗКИ ОТ ШЛАМОВ И ДЕФОРМАЦИЙ ОТ ПОДРАБОТКИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИЖуравков М.А.¹, Кологривко А.А.², Коновалов О.Л.¹, Галузо О.Г.², Романов Д.В.²¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследований прочностных свойств противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки реконструируемой северной карты шламохранилища четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий» и даны практические рекомендации по его использованию, обеспечивающие геологическую безопасность в период строительства и эксплуатации шламохранилища. Интерпретированы результаты модельных исследований поведения породного массива на участке реконструируемого шламохранилища. Дана оценка геологической безопасности применения противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки Вторым и Третьим калийными горизонтами в процессе эксплуатации северной карты шламохранилища.

Введение

Необходимость обеспечения поддержания производственных мощностей калийных предприятий в условиях ожидаемого заполнения отходами обогащения существующих карт шламохранилищ до их проектных отметок диктует развитие системы организации хвостовых хозяйств с реализацией мероприятий, снижающих техногенную нагрузку в районе, как за счет уменьшения изъятия дополнительных площадей под солеотвалы, используя при этом отработанные шламохранилища в качестве оснований при расширении солеотвалов, так и за счет реконструкции действующих шламохранилищ с надежным складированием в них жидких отходов, обеспечивающим геологическую безопасность эксплуатации шламохранилищ [1-4].

Так, эксплуатируемое шламохранилище четвертого рудоуправления ОАО «Беларуськалий» (далее – шламохранилище 4 РУ) практически заполнено. Реконструкция северной карты с получением дополнительной емкости 9,9841 млн м³ для складирования шламов обеспечит 4 РУ емкостями до 2027 года [5].

Для поэтапного и скорейшего ввода в эксплуатацию новых емкостей предусматривается реконструкция северной карты шламохранилища 4РУ в три пусковых комплекса. Первый пусковой комплекс обеспечивает наращивание дамб Д-2, Д-4 и дамбы рассолосборника до абсолютной отметки (далее – отметка) +172,90 м, наращивание дамбы Д-1 до отметки +170,50 м с устройством низового откоса до поверхности земли, устройство дамбы Д-3. Второй – строительство дамбы Д-7 до отметки +172,90 м, части

дамбы Д-6 до отметки +167,75 м, части дамбы Д-8 до отметки +160,00 м, ложа шламохранилища с отметкой дна +153,00 м. Третий – полное строительство дамб Д-5, Д-6 до отметки +172,90 м, полное строительство дамбы Д-8, ложа шламохранилища с отметкой дна +154,00 м. Отметки дна ложа второго и третьего пусковых комплексов, соответственно +153,00 м и +154,00 м, запроектированы, исходя из условий залегания безнапорных грунтовых вод, вскрытых на отметках от +145,99 до +149,50 м, максимальных ожидаемых оседаний земной поверхности от разработки Второго и Третьего калийных горизонтов, соответственно после 2036 и 2065 годов (2,6 м на ложе второго пускового комплекса и 2,5 м на ложе третьего), объемов выемки грунта для строительства.

Строительство последнего – третьего пускового комплекса – планируется завершить к 2019 году. В результате, общая емкость северной карты составит 14,27 млн м³, в том числе дополнительная – 9,984 млн м³. Шламохранилище 4 РУ будет располагаться на площади 127,7 га, в том числе на вновь отведенной площади 67,0 га.

Ограждающие дамбы Д-2, Д-3, Д-4, Д-5, Д-6, Д-7 относятся к III классу гидротехнических сооружений (согласно ТКП 45-3.04-169-2009). Длина дамб: Д-2 – 636 м, Д-3 – 977 м, Д-4 – 529 м, Д-5 – 635 м, Д-6 – 835 м, Д-7 – 637 м. Дамбы Д-2 и Д-4 наращиваются наружу на существующие ограждающие дамбы северной карты. Дамбы Д-5, Д-6, Д-7 – вновь отсыпанные. Существующая дамба Д-3 является разделительной между существующей южной картой и реконструируемой северной картой шламохранилища 4 РУ. Дамба Д-1 является разделительной между первым и вторым пусковыми комплексами и затапливается в третьем пусковом комплексе. Дамба наращивается наружу на существующую ограждающую дамбу северной карты до отметки гребня +170,50 м. Длина дамбы Д-1 – 909 м. Дамба Д-8 устраивается в выемке до отметки гребня +160,00 м, является разделительной между вторым и третьим пусковыми комплексами и затапливается в третьем пусковом комплексе. Длина дамбы Д-8 – 663 м. Возвышение гребня дамб над максимальным уровнем заполнения шламохранилища принято 1,50 м. В результате, новое ложе шламохранилища будет состоять из частей второго и третьего пусковых комплексов, разделенных дамбой Д-8.

Откосы ложа шламохранилища являются продолжением откосов дамб шламохранилища и по конструкции они такие же, как и в дамбах. Дно ложа конструктивно состоит из подстилающего слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,15 м, противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В [6] проектной толщиной 0,35 мм, защитного слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,10 м, защитного слоя из местного грунта толщиной 0,40 м.

От верха экрана до бермы на отметке +167,90 м принята толщина пленочного экрана 0,20 мм, ниже бермы и на дне ложа шламохранилища – 0,35 мм. Для устранения появления в пленочном экране растягивающих напряжений, которые будут вызваны процессами сдвижения пород и деформациями земной поверхности при подработке после 2036 года, пленку предусмотрено укладывать волнообразно без натяжения с компенсирующими складками с шагом 20 м вдоль осей дамб.

Конструкция экрана позволяет использовать материалы, производимые предприятиями республики. В шламохранилище предполагается хранение глинисто-солевых шламов и рассолов, относящихся к четвертому классу опасности (Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 31.12.2010 № 63). Так, складироваемые отходы – глинисто-солевые шламы (ж:т = 1), содержание солей NaCl, KCl – 200-220 г/л. В жидкой (ж) фазе содержание шлама составляет до 8,5 % KCl, до 13,5 % NaCl и до 1 % CaCl₂, CaSO₄. В твердой (т) фазе шлама 70-75 % нерастворимого остатка (карбонаты, сульфаты, полевой шпат, кварц, гидрослюда и др.).

Подчеркнем, что для предотвращения загрязнения грунтовых вод рассолами с содержанием KCl , $NaCl$ в реконструируемом шламохранилище предусмотрено [5] устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В с минимально принятой ее проектной толщиной 0,20 мм, устраиваемого согласно [7].

Исследованиями [8, 9] установлено, что фильтрация рассолов из шламохранилищ калийного производства, ложе которых не обустроено противодиффузионным экраном, носит затухающий характер. Это связано с формированием уплотненного слоя глинисто-солевых шламовых отходов, характеризующегося меньшими фильтрационными свойствами, чем основания шламохранилищ, вследствие дифференциации твердой и жидкой фаз на стадии их осаждения и последующего уплотнения осадка и происходящих физико-химических процессов, сопровождающихся кристаллизацией галита из насыщенного рассола на поверхности глинистых частиц, служащих центрами кристаллизации в результате его перенасыщенности.

Отметим, что площадка строительства подвержена вредному влиянию деформаций земной поверхности на конец процесса сдвижения от отработки Второго (горизонт –440 м) и Третьего (горизонт –670 м) калийных горизонтов столбовой системой разработки с валовой выемкой руды. Очистная выемка Второго калийного горизонта будет вестись в период 2038-2061 гг. лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м, Третьего калийного горизонта – в период 2062-2077 гг. в сложных горно-геологических условиях лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м. Проектные величины ожидаемых деформаций составят следующие значения: оседание $2012 \div 2386$ мм, наклон $(2,9 \div 3,6) \times 10^{-3}$, кривизна $(-0,30 \div 1,41) \times 10^{-4}$ 1/м, горизонтальные деформации $(-0,35 \div 2,80) \times 10^{-3}$ [5]. Для ускорения формирования рассолонепроницаемого глинисто-солевого слоя предусмотрено устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки в основании строящегося шламохранилища с подачей на первом этапе глинисто-солевой смеси, жидкая фаза которой имеет минерализацию не менее 250 г/л. При таком составе в основании осажденной толщи шламов будет сформирован защитный экран, который в процессе эксплуатации пленки будет служить барьером на пути фильтрации рассолов и диффузии.

Поэтому необходимо было выполнить исследования по изучению геоэкологической безопасности эксплуатации шламохранилища 4 РУ в части предотвращения фильтрации рассолов и диффузионного проникновения солей в подстилающие грунты и грунтовые воды и недопущения, тем самым, осложнения техногенеза в районе размещения шламохранилища, вследствие появления новых условий при воздействии прогнозируемой нагрузки (давления) от шламов на противодиффузионный экран из полиэтиленовой пленки и подработки шламохранилища в период его эксплуатации.

Заметим, что прочностные характеристики полиэтиленовых пленок, используемых в качестве противодиффузионных экранов, согласно [6], представлены их минимальными значениями. В этой связи, исследования прочностных свойств полиэтиленовой пленки, используемой в условиях производства строительных работ, представляются актуальными для практических целей, принимая во внимание то обстоятельство, что реальные прочностные характеристики полиэтиленовой пленки используются в качестве исходных данных для исследований воздействия на противодиффузионный экран нагрузок от шламов и деформаций от подработки шламохранилища 4 РУ в период его эксплуатации.

Изложенное выше свидетельствует об актуальности исследований по оценке геоэкологической безопасности применения противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В с минимально принятой ее проектной толщиной 0,20 мм в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов ~20 м и деформаций

от подработки горными работами Второго калийного горизонта (горизонт –440 м) столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и Третьего калийного горизонта (горизонт –670 м) в сложных горно-геологических условиях столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м в процессе эксплуатации северной карты шламохранилища 4 РУ.

Результаты исследований и их интерпретация

Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве [10], сопротивление раздиру [11], водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию [12] представлены в таблицах 1 и 2. Графическая зависимость нагрузки от удлинения полиэтиленовой пленки толщиной 0,20 мм представлена на рисунке 1.

Таблица 1. – Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, сопротивление раздиру

Наименование показателя	Значения показателей					
	частные					средние
Толщина пленки, мм	0,20	0,19	0,21	0,20	0,18	0,20
Прочность при растяжении пленки, МПа	15,8	15,8	16,2	16,5	15,8	16,0
Относительное удлинение при разрыве, %	535	500	470	515	530	510
Сопротивление раздиру, Н/мм	81	86	86	81	86	84

Таблица 2. – Результаты исследований полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм на водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию

Наименование показателя	Значения показателей
Водонепроницаемость	В течение 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась
Сопротивление динамическому продавливанию	После динамического продавливания в течение 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась

Исследования прочностных свойств противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки марки В выполнены для нормального температурного режима (образцы кондиционировали не менее 16 ч при температуре 23 ± 2 °С). Такое решение обосновано тем обстоятельством, что согласно пункту 5.2.3 [5], дно ложа шламохранилища конструктивно состоит из подстилающего слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,15 м, противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки, защитного слоя из песка с частицами максимальной крупности до 5 мм толщиной 0,10 м, защитного слоя из местного грунта толщиной 0,40 м.

Известно, например, из пункта 5.4 [7], что устройство противодиффузионного экрана из полиэтиленовой пленки, как правило, выполняют при положительной температуре воздуха. В случае же отрицательной температуры должно быть обеспечено соответствие качества грунтов подстилающего и защитного слоев, а также пленочного элемента требуемому, что и предусматривается пунктами 5.2.3 и 5.2.4 [5].

Противофильтрационный экран должен быть надежным в эксплуатации в течение всего срока службы шламохранилища. Надежность его эксплуатации должна определяться в первую очередь свойствами полиэтиленовой пленки. Эти свойства должны быть таковы, чтобы различные виды воздействий (например, механические напряжения, влияние расслолов, колебания температур и др.), возможных как в эксплуатационный, так и строительный периоды, не вызвали бы изменений в самой полиэтиленовой пленке или ее механических повреждений, недопустимых с точки зрения надежности противофильтрационного экрана. Так, недопустимыми являются не только проколы, порезы, некачественно выполненные компенсационные складки, некачественно выполненные деформационные швы, но и их изменения, которые могут привести к нарушению сплошности полиэтиленовой пленки и, следовательно, к потере водонепроницаемости в срок, меньший срока службы самого шламохранилища. При ведении строительных и горных работ должен осуществляться постоянный геомеханический мониторинг за состоянием горного массива, включающий как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов.

При отсутствии в полиэтиленовой пленке механических повреждений, благодаря ее малой пористости, движение воды (водной среды) через пленку возможно лишь в виде диффузии молекул воды и растворенных в ней веществ. Диффузионные потери воды, однако, крайне незначительны. По результатам испытаний установлено, что проектная полиэтиленовая пленка является водонепроницаемой. Так, при испытании пленки на водонепроницаемость и сопротивление динамическому продавливанию не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа, на поверхности пленки вода не появилась.

Из характеристик полиэтиленовой пленки главными следует считать степень деформирования, прочность, водонепроницаемость. От самой пленки требуется способность к большим деформациям. В связи с тем, что пленка имеет малую толщину – 0,20 мм – она не участвует в статической работе ложа шламохранилища, а лишь адаптируется к условиям его работы в процессе нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами. В частности, при облегании неровностей контактной поверхности в пленке возникают неравномерно распределенные по толщине деформации растяжения и сжатия. Величины этих деформаций зависят от размеров выступов или впадин зоны контакта и толщины пленки [13].

В процессе эксплуатации противофильтрационных экранов из полиэтиленовых пленок под воздействием тепла, ультрафиолетового излучения и кислорода пленки стареют, что выражается в постепенном ухудшении их прочностных свойств и развитии микродефектности. Оценка старения полиэтиленовых пленок в условиях эксплуатации, в конечном счете, имеет один действительный критерий – опыт эксплуатации. Расположенные в грунтах пленки практически не стареют или скорость их старения чрезвычайно мала [13]. Одним из факторов, вызывающих изменение важнейших прочностных свойств полиэтиленовой пленки во времени, является атмосферное воздействие, глав-

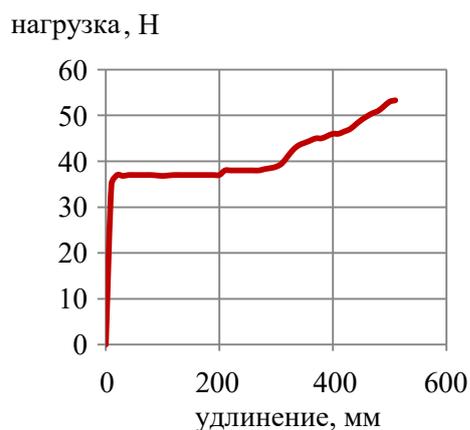


Рисунок 1. – Зависимость нагрузки от удлинения полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм

ным образом ультрафиолетовая часть солнечной радиации, воздействующая на пленку в случае ее незащищенного состояния. Защитный слой над пленкой исключает воздействие на материал ультрафиолетового излучения. Слой глинисто-солевых шламов существенно уменьшает участие фактора температуры и ее колебаний. Считаем, что для сведения к минимуму атмосферных воздействий необходимо максимально сократить продолжительность строительного периода, когда пленка находится в незащищенном от атмосферного воздействия состоянии.

Согласно нормам [7] при напорах более 10 м (в исследуемом случае ~20 м) толщина полиэтиленовой пленки от действия гидростатического давления определяется инженерными расчетами, исходя из условия обеспечения ее сплошности. Так, от верха экрана до бермы на отметке +167,90 м проектная толщина пленочного экрана принята 0,20 мм (минимальная проектная толщина), ниже бермы и на дне ложа шламохранилища – 0,35 мм, что должно обеспечить безопасность шламохранилища при его эксплуатации. Для полного устранения появления в полиэтиленовой пленке растягивающих напряжений, которые могут быть вызваны процессами сдвига массива горных пород и деформации земной поверхности в период подработки шламохранилища 4 РУ после 2036 года, пленку необходимо укладывать волнообразно без натяжения с компенсирующими складками с шагом 20 м вдоль осей ограждающих дамб согласно нормам, например, условиям пункта 3.8 [14] и нормам [7]. По нашему мнению, с целью повышения надежности производства работ в строительный период полиэтиленовую пленку целесообразно укладывать в два слоя.

Дополнительным фактором, повышающим надежность противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в период подработки горными работами, проводимыми с 2036 года на Втором, а с 2065 – на Третьем калийном горизонте, следует считать создание по ложе и откосам шламохранилища к началу подработки дополнительного экрана из твердой части шламовых отходов, который, согласно исследованиям [8, 15-17], даже в случае возникновения трещин в пленочном экране исключит фильтрацию из шламохранилища и будет являться дополнительной мерой защиты экрана от подработки.

По результатам изучения и анализа инженерно-геологических изысканий толщи грунтов, слагающих ложе реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ до разведанной глубины 20,0 м [18], анализа и оценки геологического строения участка реконструкции по геологическим колонкам пяти скважин № 201 (X = 14409,97 м; Y = 41409,97 м; глубина скважины 904 м), № 216 (X = 13912,05 м; Y = 39555,60 м; глубина скважины 949 м), № 305 (X = 15038,50 м; Y = 39962,07 м; глубина скважины 856,1 м), № 309 (X = 13394,88 м; Y = 40938,44 м; глубина скважины 837,5 м), № 788г (глубина скважины 570 м), с учетом проектных решений [5], планов ведения очистных работ на Втором и Третьем калийных горизонтах, принимая во внимание результаты исследований и интерпретацию прочностных свойств противofильтрационного экрана между шламом и ложем шламохранилища, составлена геометрическая и построена механико-математическая модель поведения горного массива исследуемого района (в работе непосредственно принимал участие кандидат физико-математических наук А.В. Круподеров).

Для получения максимально точных результатов, учитывая ранее проведенные исследования в части деформационных процессов в твердых деформируемых средах [19-21], принято решение об использовании плоской модели, позволяющей построить более качественное конечно-элементное разбиение. Заметим, что «наихудший», с точки зрения механического состояния пленки, случай возможен при исследовании противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки от прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки в период эксплуатации шла-

мохранилища с минимальной проектной толщиной полиэтиленовой пленки 0,20 мм (максимальная проектная толщина 0,35 мм), что позволяет представить прогнозную оценку геоэкологической безопасности эксплуатации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки шламохранилища калийного производства.

Данные по физико-механическим свойствам массива ниже 20,0 м выбраны на основе изучения результатов инженерно-геологических изысканий [18] и согласно геологическим колонкам скважин № 201, № 216, № 305, № 309, № 788г.

Считаем, что эффективность оценки геоэкологической безопасности северной карты шламохранилища 4 РУ, в основании которого устроен противofильтрационный экран из полиэтиленовой пленки марки В, определяется уровнем типизации как самих элементов единой геосистемы «шлам – противofильтрационный экран – подрабатываемый массив» (далее – единая геосистема), так и их взаимосвязей, учитывающих изменение техногенных и антропогенных факторов. Оценка зависит от уточненной инженерно-геологической информации во времени при геомеханическом мониторинге за состоянием массива горных пород в период ведения строительных и горных работ, включающем как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов. В этой связи основой для оценки геоэкологической безопасности эксплуатации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки северной карты шламохранилища 4 РУ является установление на базе фактической инженерно-геологической информации области рациональных значений параметров локального поведения массива с построением его механико-математической модели. Модель должна обладать свойствами открытой системы и отображать представление об объекте и протекающих в нем процессах, исходя из имеющейся на момент исследования инженерно-геологической информации. Такой подход к изучению единой геосистемы позволит принимать основополагающие решения при проектировании реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ, в дальнейшем трансформируемые в конкретные инженерные решения с учетом существенных для объекта техногенных факторов. Реализация изложенного позволит в процессе оценки техногенеза учитывать неопределенность исходной информации (особенно горно-геологической), разницу во времени между принятием решения и его реализацией, а также принципиальные трудности изменения этих решений в процессе эксплуатации шламохранилища, характеризующиеся совокупностью переменных природных, техногенных и антропогенных факторов, взаимодействие которых создает множество комбинаций, отражающих специфику требований к технологии ведения работ.

Принимая во внимание вышеизложенное, и в связи с тем, что реальные технологические процессы происходят в большом временном интервале, считаем корректным решение задач в квазистатической постановке. При этом, исходя из основной цели исследований, допустимо верхние слои, включая песок, дамбы и шлам, принять как изотропные.

В соответствии с принятыми допущениями, связь между компонентами напряженно-деформируемого состояния (НДС) для элементов рассматриваемой единой геосистемы можно представить в виде (1).

Поскольку ниже 20,0 м слоистость массива оказывает значительное влияние на распределение компонент НДС, его поведение рассматривается в рамках модели трансверсально-изотропной среды. В этом случае состояние массива определяется заданием пяти констант: E_p и ν_p – соответственно модуль Юнга и коэффициент Пуассона в горизонтальной плоскости (плоскости изотропии); E_z , ν_{zp} и G_{zp} – соответственно модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига в вертикальном направлении. Если вертикальную ось обозначить как ось Oz , закон Гука запишется в форме (2).

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где σ, ε – компоненты соответственно напряжений и деформаций;

$$\lambda, \mu \text{ – параметры Ламе, } \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)};$$

ν – коэффициент Пуассона;

E – модуль Юнга.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1-\nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_p + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_p + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{1-\nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} \lambda & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{\nu_{zp} + \nu_{pz}\nu_{zp}}{E_p E_z \Delta} & \frac{1-\nu_p^2}{E_p^2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{zp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E_p}{1+\nu_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\nu_{pz} = \frac{E_p}{E_z} \nu_{zp},$$

$$\Delta = \frac{(1+\nu_p)(1-\nu_p-2\nu_{zp}\nu_{pz})}{E_p^2 E_z}.$$

В связи с тем, что полиэтиленовая пленка, в силу своих геометрических параметров, не оказывает существенного влияния на распределение компонент напряжений в массиве, а может лишь оказывать некоторое влияние на тип контакта тел, между которыми она располагается, учитывать ее непосредственно в модели представляется нецелесообразным. Более эффективно выполнить варьирование коэффициентом трения между дамбами и шламом, а также между песком и шламом. Деформацию же самой полиэтиленовой пленки в модели можно оценить по деформациям прилегающих к ней тел (элементов массива и инженерных объектов) в месте ее устройства.

Упругие свойства грунта и массива представлены в таблицах 3 и 4, интервалы которых выбраны по данным литологии скважин № 201, № 216, № 305, № 309, № 788г.

Таблица 3. – Упругие свойства грунта

Вид грунта	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
шлам	7	0,499	2000
песок средний	27	0,300	2000

Таблица 4. – Упругие свойства массива горных пород

Слой	E_p , ГПа	E_z , ГПа	ν_p	ν_z	G_{zp} , ГПа	Кровля	Подошва
осадочный	1	1	0,3	0,3	0,0577	130,985	10
глинисто-мергелистый	5	5	0,3	0,3	0,2850	10	–400
соляной	14	14	0,3	0,3	0,8000	–400	–1000

Механико-математическая модель, описывающая НДС исследуемой единой геосистемы, включает уравнения равновесия (3), совместности деформаций (4), состояния среды – закон Гука (1), а также граничные условия.

В соответствии с введенной механико-математической модельной задачей граничные условия выбирались в следующем виде: между всеми слоями задавались условия полного контакта; соляная толща по своей подошве предполагается жестко закрепленной; на боковых границах перемещения в горизонтальном направлении отсутствуют; на границах контакта шлама и песка, а также шлама и дамб задаются условия типа (5).

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = -\rho g.$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial y \partial x}. \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sigma_{n1} = \sigma_{n2}; \\ u_{n1} = u_{n2}; \\ u_{\tau 1} = u_{\tau 2}, \quad |\sigma_{\tau}| < f \cdot \sigma_n; \\ \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2}, \quad |\sigma_{\tau}| < f \cdot \sigma_n; \\ \sigma_{\tau 1} = \sigma_{\tau 2} = f \cdot \sigma_n, \quad |\sigma_{\tau}| > f \cdot \sigma_n, \end{cases} \quad (5)$$

где 1, 2 – контактирующие тела;

f – коэффициент трения;

σ_n, σ_{τ} – соответственно нормальные и касательные усилия;

u_n, u_{τ} – соответственно нормальные и касательные перемещения.

Схема решения задачи следующая. На первом шаге вычислялось НДС массива с учетом дамб, но без шлама, при этом НДС принималось как начальное. На втором шаге вычислялось НДС массива с учетом влияния шлама (рисунок 2), при этом анализировались возможные деформации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки, вызванные прогнозируемой нагрузкой на него со стороны шлама с учетом исследованных прочностных свойств. Далее последовательно удалялись блоки сначала Второго (горизонт –440 м), а затем Третьего (горизонт –670 м) калийного горизонтов.

На этих шагах вычислялось НДС массива и деформации противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки.

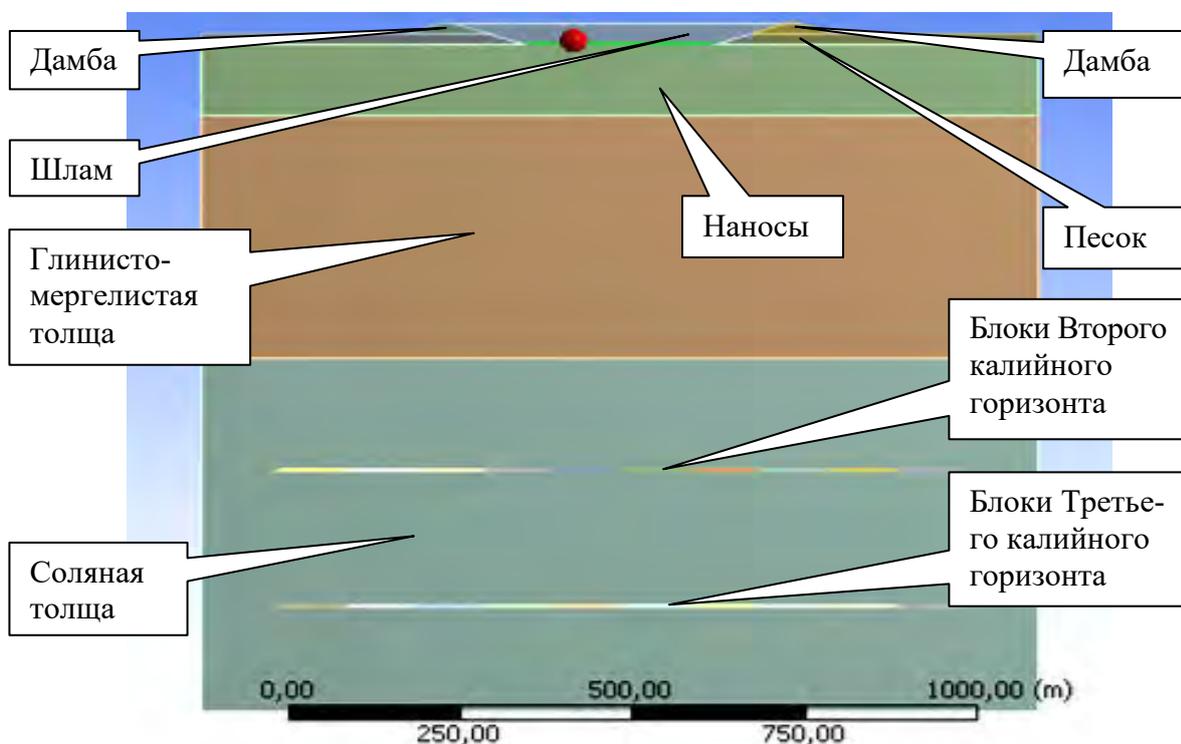


Рисунок 2. – Геометрическая модель участка реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ при наличии шлама

Проведена серия модельных расчетов для различных значений коэффициента трения на поверхностях контакта в месте устройства полиэтиленовой пленки для случаев отсутствия контакта ($f = 0$) и полного контакта ($f = 1$), а также при $f = 0,3$. Проведенные модельные исследования показали, что отработка блоков Третьего калийного горизонта (после отработки блоков Второго калийного горизонта) при отсутствии и полном контактах не оказывает существенного влияния на распределение максимальных главных напряжений в районе реконструируемого шламохранилища, в ложе которого устроен противофильтрационный экран из полиэтиленовой пленки. На рисунках 3-5 представлены некоторые результаты расчетов по максимальным главным деформациям при гладком контакте.

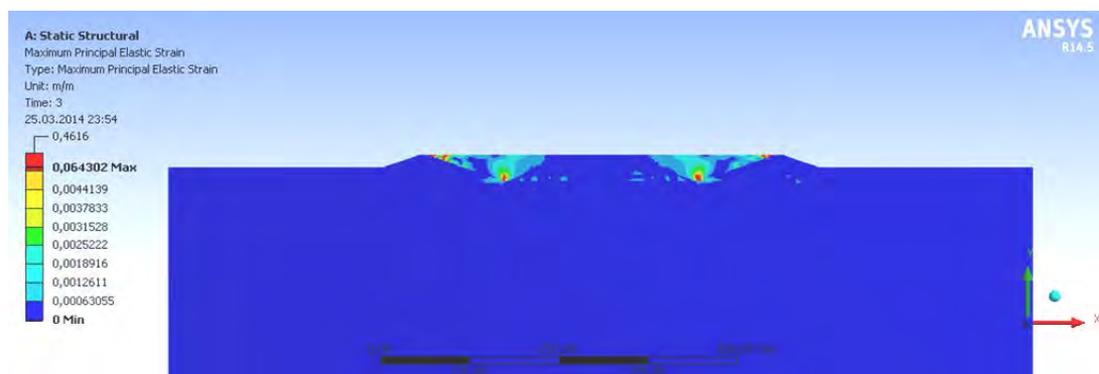
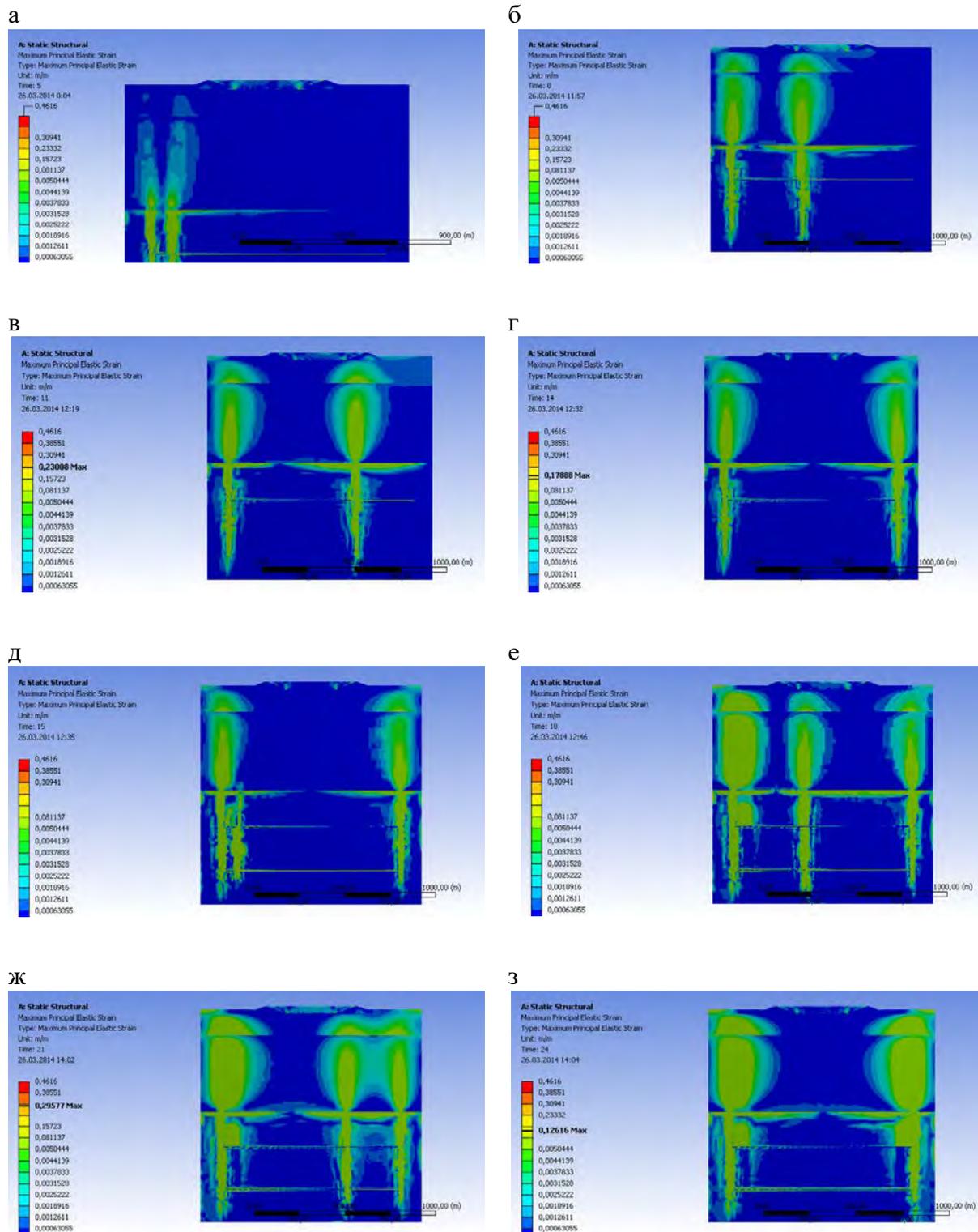
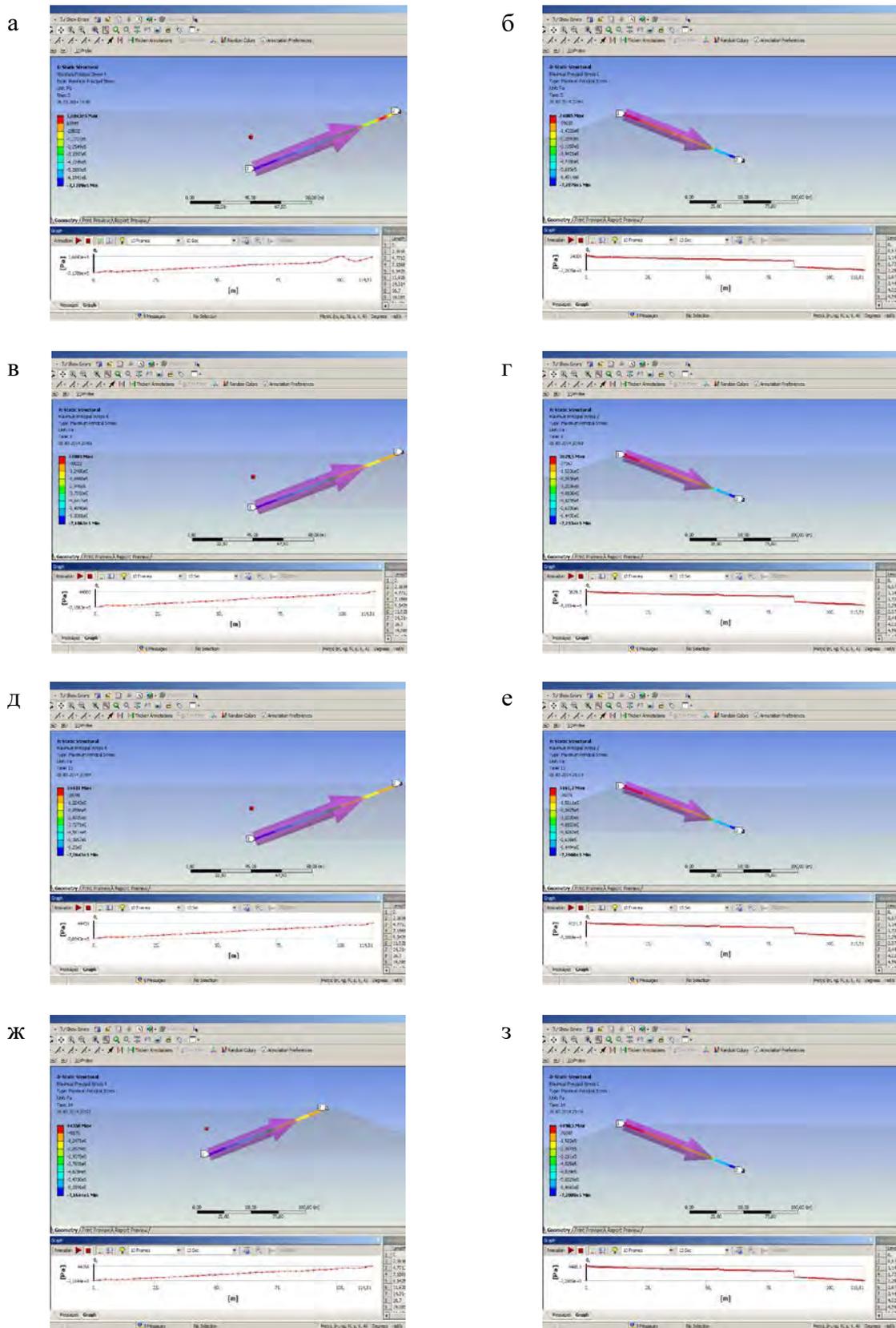


Рисунок 3. – Распределение максимальных главных деформаций при наличии шлама



а, б, в, г – после отработки соответственно первого, четвертого, седьмого и десятого блоков Второго калийного горизонта; д, е, ж, з – после отработки соответственно первого, четвертого, седьмого и десятого блока Третьего калийного горизонта
 Рисунок 4. – Распределение максимальных главных деформаций после отработки блоков Второго и Третьего калийных горизонтов



а, б – после обработки первого блока; в, г – четвертого; д, е – седьмого; ж, з – десятого
 Рисунок 5. – Распределение максимальных главных напряжений в окрестности линии контакта шлама с песком после обработки блоков Второго калийного горизонта

Интерпретация модельных исследований, выполненных для случаев отсутствия и полного контактов шлама и дамб, позволяет считать значительным запас прочности исследуемого противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с учетом «наихудшего» варианта развития геомеханической ситуации и минимально принятой по проекту толщиной пленки. Угроза разрыва противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях воздействия на него прогнозируемой нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами Второго и Третьего калийных горизонтов не прослеживается. Так, максимальные растягивающие деформации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта не превышают 0,20 (20 %), полного – 0,15 (15 %), что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными деформациями разрыва полиэтиленовой пленки в 510 %. Максимальные растягивающие напряжения противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта не превышают 3×10^5 Па, полного – 3×10^4 Па, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными напряжениями разрыва полиэтиленовой пленки $16,0 \times 10^6$ Па.

Заключение

В результате проведенных исследований по оценке геоэкологической безопасности эксплуатации противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ ОАО «Беларуськалий» в условиях прогнозируемого воздействия нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами изучена толща грунтов, слагающая ложе шламохранилища и геологическое строение массива участка, на котором ведут работы по реконструкции, принимая во внимание проектные решения в части реконструкции шламохранилища и результаты исследований прочностных свойств противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с ее минимальной проектной толщиной. На основе исходных данных построена механико-математическая модель поведения исследуемого участка массива и проведены модельные исследования. Их обобщение позволяет представить следующие интерпретированные заключения.

1. Подработка реконструируемой северной карты шламохранилища 4 РУ ОАО «Беларуськалий», в основании которого устроен противofильтрационный экран из полиэтиленовой пленки марки В, будет вестись горными работами Второго калийного горизонта (горизонт –440 м) в период 2038-2061 гг. столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и Третьего калийного горизонта (горизонт –670 м) в период 2062-2077 гг. в сложных горно-геологических условиях столбовой системой разработки с валовой выемкой руды лавами длиной 100-200 м с вынимаемой мощностью ~2,2 м.

Подработка не будет оказывать существенного влияния на распределение максимальных главных напряжений в районе шламохранилища (значительных увеличений главных напряжений на шламохранилище, в основании которого устроен противofильтрационный экран из полиэтиленовой пленки, по результатам исследований не прослеживается).

На контакте шлама и подстилающего противofильтрационный экран слоя мощностью 0,15 м, сложенного из песка с частицами крупностью не более 5 мм, максимальные главные напряжения являются сжимающими, что не представляет опасности для принятого по проекту противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки и не может представлять опасности для укладываемой ниже бермы и на ложе шлаго-

хранилища противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В максимальной проектной толщины 0,35 мм.

2. Максимальные растягивающие деформации (относительное удлинение при разрыве) противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта по результатам модельных исследований не превышают 20 %, в случае полного контакта – не превышают 15 %, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными деформациями разрыва полиэтиленовой пленки, составляющими 510 % по результатам исследований ее прочностных свойств.

3. Максимальные растягивающие напряжения (прочность при растяжении) противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В толщиной 0,20 мм в случае гладкого контакта по результатам модельных исследований не превышают $3,0 \times 10^5$ Па, в случае полного контакта – не превышают $3,0 \times 10^4$ Па, что является достаточно малыми величинами в сравнении с предельными напряжениями разрыва полиэтиленовой пленки, составляющими $16,0 \times 10^6$ Па по результатам исследований ее прочностных свойств.

4. По результатам численных экспериментов по оценке геоэкологической безопасности применения противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В минимальной проектной толщиной 0,20 мм в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами при эксплуатации шламохранилища, принимая во внимание прогнозируемый «наихудший» с точки зрения механики случай развития ситуации (для получения максимально точных результатов, использована плоская модель; предельные характеристики приняты для минимальной толщины эксплуатируемого противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки марки В 0,20 мм), при значительном запасе прочности экрана, угроза разрыва полиэтиленовой пленки от растягивающих напряжений не прослеживается.

5. При отсутствии в проектируемой полиэтиленовой пленке механических повреждений, благодаря ее малой пористости, движение воды через пленку возможно лишь в виде диффузии молекул воды и растворенных в ней веществ. Диффузионные потери воды крайне незначительны. Полиэтиленовая пленка является водонепроницаемой. Так, при испытании пленки на водонепроницаемость не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась; при испытании пленки на сопротивление динамическому продавливанию не менее 24 ч при давлении 1,0 МПа на поверхности пленки вода не появилась.

6. Применение противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия на него нагрузки от шламов (~20 м) и деформаций от подработки горными работами Второго и Третьего калийных горизонтов, где очистная выемка руды будет вестись соответственно лавами длиной ~250 м с вынимаемой мощностью ~2,3 м и лавами длиной 100-200 м в сложных горно-геологических условиях с вынимаемой мощностью ~2,2 м, при эксплуатации северной карты шламохранилища 4 РУ обеспечивает геоэкологическую безопасность при толщине пленки как минимум 0,20 мм.

7. Учитывая проведенные модельные испытания поведения противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки в условиях прогнозируемого воздействия нагрузки от шламов и деформаций от подработки горными работами, а также испытания пленки на водонепроницаемость, можно констатировать, что предусмотренная проектом полиэтиленовая пленка марки В толщиной 0,20 и 0,35 мм обеспечивает защиту грунтовых вод от минерализации. При этом увеличение ее толщины не требуется при условии обеспечения проектных требований по ее укладке.

8. При устройстве противofильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки с целью обеспечения геоэкологической безопасности района шламохранилища 4 РУ проектируемый противofильтрационный экран должен быть надежным в эксплуатации в течение всего срока службы шламохранилища. Надежность его эксплуатации определяется, в первую очередь, свойствами полиэтиленовой пленки, которые должны быть таковы, чтобы различные виды воздействий (например, механические напряжения, влияние рассолов, колебания температур и др.), возможные как в эксплуатационный, так и строительный периоды, не вызвали бы изменений в самой полиэтиленовой пленке или ее механических повреждений, недопустимых с точки зрения надежности противofильтрационного экрана. Так, недопустимыми являются не только проколы, порезы, некачественно выполненные компенсационные складки, некачественно выполненные деформационные швы, но и деформации пленки, которые могут привести к нарушению сплошности полиэтиленовой пленки и, следовательно, к потере водонепроницаемости в срок, меньший срока службы самого шламохранилища.

В целях повышения надежности производства работ в строительный период полиэтиленовую пленку целесообразно укладывать в два слоя.

Принимая во внимание исключительную важность соблюдения требований нормативных документов, многолетнюю положительную практику укладки полиэтиленовых пленок и в целом – эксплуатацию шламохранилищ, для защиты пленки от разрыва или сведения к минимуму возможности нарушения противofильтрационного экрана при растяжениях в процессе подработки, рекомендуется укладывать ее с компенсирующими складками шагом 20,0 м, расположенными вдоль осей ограждающих дамб.

При ведении строительных и горных работ должен осуществляться постоянный геомеханический мониторинг за состоянием горного массива, включающий как визуальный, так и инструментальный контроль с применением инженерно-геологических и геофизических методов.

9. При изменении технических решений по использованию противofильтрационного экрана и, как следствие, изменении условий его эксплуатации (например, использование отработанного шламохранилища в качестве основания солеотвала) необходимо проводить дополнительные исследования.

10. Для мониторинга состояния геологической среды в районе эксплуатации полиэтиленовой пленки в качестве противofильтрационного экрана рекомендуется проводить гидрогеологические и геофизические исследования.

Список цитированных источников

1. **Шемет, С.Ф.** Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Горный журнал. – 2015. – № 5. – С. 100-104.

2. **Смычник, А.Д.** Технологии складирования отходов калийного производства / А.Д. Смычник, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // X Юбилейная национальная конф. с междунар. участием по открытой и подводной добыче полезных ископаемых: сб. науч. статей. – Варна, 2009. – С. 494-496.

3. **Журавков, М.А.** Формирование солеотвала из галитовых отходов способом гидронамыва / М.А. Журавков, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко, А.В. Круподеров, О.Л. Коновалов // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики : сб. науч. трудов 9-ой междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Минск, 29-31 окт. 2013 г.: в

2 т. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: А.Б. Копылов, И.А. Басалай. – Минск, 2013. – Т. 1. – С. 246-253.

4. **Кологривко, А.А.** Геоэкологические задачи при реконструкции шламохранилищ калийного производства / А.А. Кологривко // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 10-ой Междунар. конф. по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики, Тула, 6-7 нояб. 2014 г.: в 2 т. / Тул. гос. ун-т; ред.: Р.А. Ковалев. – Тула, 2014. – Т. 1. – С. 363-368.

5. Архитектурный проект «Техпереворужение СОФ 4 РУ. Реконструкция северной карты шламохранилища. Первый пусковой комплекс. Второй пусковой комплекс. Третий пусковой комплекс». Пояснительная записка / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2012. – Т. 1. – 180 с.

6. Пленка полиэтиленовая. Технические условия: ГОСТ 10354-82. – Введ. 01.07.83. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам. – 2007. – 22 с.

7. Инструкция по проектированию и строительству противofильтрационных устройств из полиэтиленовой пленки для искусственных водоемов: СН 551-82: утв. Постановл. Государственного Комитета СССР по делам строительства 31.05.82. – М.: Стройиздат, 1983. – 40 с.

8. **Колпашников, Г.А.** Техногенез и геологическая среда / Г.А. Колпашников. – Минск: БНТУ, 2006. – 182 с.

9. **Кологривко, А.А.** Прогнозирование и предотвращение фильтрации рассолов в период подработки шламохранилищ / А.А. Кологривко // Промышленная экология: сб. тр. Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 27-28 окт. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; ред.: И.А. Басалай. – Минск, 2015. – С. 118-121.

10. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение: ГОСТ 14236-81. – Введ. 09.02.81. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам: Министерство химической промышленности. – 1989. – 8 с.

11. Пленки полимерные. Методы определения сопротивления раздиру: ГОСТ 26128-84. – Введ. 01.01.85. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам. – 1984. – 12 с.

12. Материалы рулонные кровельные и гидроизоляционные. Методы испытаний: ГОСТ 2678-94. – Введ. 01.01.96. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации и техническому нормированию в строительстве: Институт ВНИИстройполимер АОТ «Полимерстройматериал» РФ. – 2003. – 28 с.

13. Пленочные противofильтрационные устройства гидротехнических сооружений / В.Д. Глебов [и др.]; под ред. И.Е. Кричевского. – М.: Энергия, 1976. – 208 с.

14. Указания по охране сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок в условиях Старобинского месторождения калийных солей: утв. Проматомнадзором при МЧС РБ 03.04.01 г. – Солигорск, 2002. – 341 с.

15. Технические решения по усовершенствованию конструкции дамб шламохранилищ с мерами их охраны в условиях подработки / БФ ВНИИГ; рук. А.В. Воробьев; исполн. Г.П. Иванов, С.Ф. Шемет. – Минск, 1991. – 14 с.

16. Разработка рекомендаций по использованию глинистых грунтов и шламов для устройства противofильтрационных элементов шламохранилища ПО «Беларуськалий» (Томилова гора): отчет о НИР / ВНИИ ВОДГЕО; рук. В.В. Буренкова; отв. исполн. В.В. Буренкова. – М., 1991. – 37 с.

17. Исследование и разработка специальных мер защиты дамб шламохранилищ на калийных месторождениях: отчет о НИР (заключ.) / ЛПИ; науч. рук. Г.Я. Булатов; отв. исполн. В.А. Леонов. – Л., 1983. – 55 с.

18. Техперевооружение СОФ 4 РУ. Реконструкция северной карты шламохранилища. Первая очередь. Вторая очередь: отчет об инженерно-геологических изысканиях по объекту. Часть 1 / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2011. – 113 с.

19. **Журавков, М.А.** Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов) / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2002. – 456 с.

20. **Журавков, М.А.** Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований. Курс лекций / М.А. Журавков. – Минск: БГУ, 2008. – 247 с.

21. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков [и др.]; под общ. ред. М.А. Журавкова. – Минск: БГУ, 2008. – 443 с.

Zhuravkov M.A., Kologrivko A.A., Konovalov O.L., Galuzo O.G., Romanov D.V.

Geocological safety assessment of the impervious screen exploitation from sludge depository polyethylene film of potash production in the foreseeable load action conditions from sludge and deformations of undermining mining operations

The research results of strength properties of the impervious screen from a polyethylene film of the reconstructed sludge depository northern card of the fourth mining administration of JSC "Belaruskali" and the practical recommendations on its use providing geocological safety during construction and exploitation of the sludge depository are given in the article. The results of model studies of rock mass performance at a site of the reconstructed sludge depository are interpreted. The assessment of geocological safety of the use of the impervious screen from a polyethylene film in the foreseeable load action conditions from sludge and deformations from undermining of the Second and Third potash horizons during operation of the sludge depository northern card is given in the article.

Поступила в редакцию 03.08.2016 г.

УДК 622.363.2:658.562.4

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Гец А.К., Оника С.Г., Халявкин Ф.Г. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье рассмотрен принцип имитационного моделирования процессов горного производства на основе вентильных схем преобразования ресурсов. Предложенный принцип может быть использован для имитационного моделирования различных (непрерывных или дискретных) технологических процессов горного производства, имеющих детерминированный или стохастический характер.

Введение

Технологические процессы горного производства представляют собой совокупность подпроцессов подготовки полезного ископаемого к добыче (подготовленные работы), собственно добычи (очистные работы), транспортировки (система конвейеров – ствол – дробление – склад руды или обогатительная фабрика). В свою очередь подпроцессы могут быть представлены в виде совокупности технологических операций, определяющих количественные и качественные характеристики подпроцессов. При выполнении очистных работ примерами операций могут быть: выемка, перегон комбайна, передвижка конвейера и крепи и др., взаимоувязка которых отражает динамику функционирования отдельного подпроцесса во времени и пространстве.

Основная часть

Обязательным условием объективного представления операций и подпроцессов в системе «технологический процесс» является учет факторов, отклоняющих течение операций (элементов процесса) от нормального и имеющих свое проявление, как правило, в виде случайных воздействий на него [1].

Для качественного и количественного представления отдельного подпроцесса, как совокупности операций, структурно объединенных объективно существующими связями, можно использовать метод вентильных преобразований ресурсов, как один из методов имитационного моделирования [1].

Достоинства этого метода заключается в следующем:

- наглядность;
- возможность представления непрерывных и дискретных, детерминированных и стохастических процессов;
- возможность учета влияния возмущающих факторов на отдельные операции подпроцессов;
- учет в динамике изменения ресурсов отдельных операций и подпроцесса в целом.

В немалой степени ход технологического процесса определяется его взаимодействием с организационной системой управления, представляющей собой руководство рудником, и со вспомогательными службами. От этого взаимодействия зависит ритмичность процесса в целом и повышение показателей работы каждого забоя в отдель-

ности. Однако, для обоснованного воздействия на технологический процесс с целью стабилизации его параметров необходимо предоставить его развитие таким образом, чтобы были отражены объективные закономерности функционирования всей совокупности забоев, т.е. нужно смоделировать процессы, дать прогноз их развития на требуемый промежуток времени.

Перед составлением вентильных схем преобразования ресурсов системы, являющихся графическим отображением операций, связанных между собой определенным образом, введем понятия и условные обозначения [2].

Вентильная модель представляет собой отображение объективно существующих закономерностей преобразования ресурсов определенной системы (подпроцесса, процесса). Она отображает последовательные фазы преобразования ресурсов и объективные взаимосвязи между этими преобразованиями. Вентильная модель служит для определения количественных характеристик материальных или информационных потоков, связывающих между собой отдельные подпроцессы и операции.

Под преобразованием ресурсов в дальнейшем понимается всякое изменение количества или качества ресурсов в фиксированной точке пространства или временного интервала. В соответствии с этим, ресурсы должны представляться таким образом, чтобы и их изменение можно было бы оценить количественными переменными.

Элементарным преобразованием (операцией) называется законченная последовательность преобразований, имеющая четко выраженные начало и конец.

Под исполнительным блоком системы будем понимать человека, группу людей или механизмы, способные осуществить регулирование интенсивности элементарного преобразования [2]. К началу выполнения элементарных преобразований необходимо наличие расходуемых ресурсов R .

В результате выполнения элементарных преобразований накапливаются ресурсы N . Всякий вентиль Ω изменяет состояние ресурсов R и N . Состояние i -го ресурса в момент времени характеризуется количественным признаком $Z_i(t)$, принимающим для каждого состояния определенное числовое значение. Признак, характеризующий состояние ресурса, выбирается таким образом, чтобы его можно было оценить количественно. Такими характеристическими признаками могут быть: готовность, запас, объем, уровень, расстояние и т.п.

Каждый ресурс поступает в вентиль из входного накопителя, имеющего определенную емкость, а после прохождения вентиля поступает в выходной накопитель, также имеющий определенную емкость. В один и тот же вентиль может поступать несколько различных потоков ресурсов и из одного и того же вентиля может выходить несколько различных потоков ресурсов. Интенсивность преобразований, определяемых вентилем, регулируется исполнительным блоком. Вентили преобразовывают ресурсы

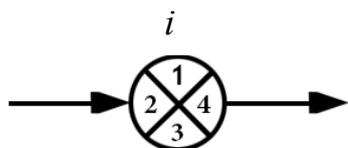


Рисунок 1. – Условное графическое изображение вентиля

только в одном направлении. На рисунке 1 приведено условное графическое изображение вентиля. Как видно, сектора вентиля 2 и 4 служат либо входом, либо выходом, соответственно, для определенной группы потоков [2].

Каждый накопитель характеризует определенную фазу преобразования ресурсов и имеет минимальную и максимальную

емкость, которая обозначается соответственно через \dot{Z}_k и \hat{Z}_k , где k – номер накопителя или индекс ресурса.

На рисунке 2 приведено условное графическое изображение накопителей k и j , связанных вентилем i .

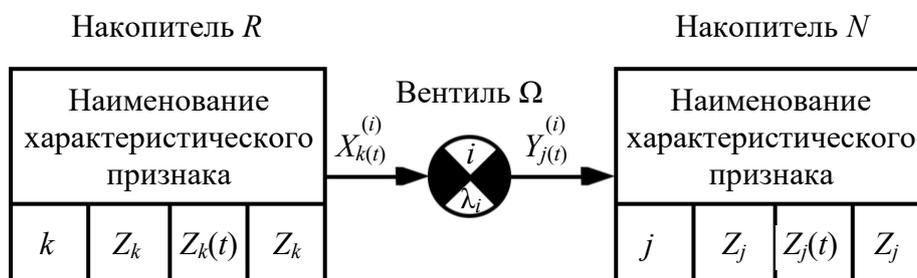


Рисунок 2. – Условное графическое изображение накопителей k и j , связанных вентилем i

Потоки изменения входных ресурсов, входящие в сектор 2 i -го вентиля, имеют определенную интенсивность в момент времени t , которая обозначается $X_{k(t)}^{(i)}$, где i – индекс вентиля, k – индекс входного накопителя (входного ресурса).

Потоки изменения выходных ресурсов, выходящие из сектора 4 i -го вентиля, также имеют определенную интенсивность в момент времени t , которая обозначается $Y_{j(t)}^{(i)}$, где i – индекс вентиля, j – индекс выходного накопителя (выходного ресурса).

Интенсивность преобразования ресурсов λ_i определяется i -м вентилем.

Предварительной процедурой, предшествующей построению вентильных моделей, должна быть процедура представления технологического процесса в виде совокупности подпроцессов, примерами которых могут служить:

- проведение горных выработок различного назначения (подготовка);
- выемка руды комбайном (очистные работы);
- транспортировка руды в шахте;
- подъем руды по стволу и транспортировка ее на поверхности.

Каждый подпроцесс делится на операции. Это деление производится таким образом, чтобы выполнение операций от начала до конца осуществлялось одним и тем же исполнительным блоком с использованием взаимосвязанных ресурсов.

Заключение

Основной целью имитационного моделирования является представление возможностей каждого забоя рудника по добыче руды по итогам моделирования в результирующих объеме и качестве. Предложенный метод имитационного моделирования с помощью вентильных схем преобразования ресурсов позволяет моделировать различные технологические процессы горного производства, исходя из статистических зависимостей параметров этих процессов во времени, пространстве и обеспеченности их ресурсами различного типа. Каждый подпроцесс или операция, имеющие переменные факторы, моделируются с заданной степенью вероятности реализации этих процессов или операций. Имитационные модели обладают наглядностью и простотой восприятия для производственного персонала горного производства.

Список цитированных источников

1. **Авдулов, П.В.** Использование вентильных моделей для определения оптимальной производственной структуры и заявок на координацию действий исполнительных блоков / П.В. Авдулов, А.Б. Баскаков, И.И. Крыжановский // Автоматизированная система управления угольной промышленностью. – 1975. – Сб. 18.
2. Технология, комплексная механизация и автоматизация подземной разработки пластовых месторождений / А.С. Бурчаков [и др.] / Раздел: Математические методы для расчета оптимальных параметров шахт и оперативного управления производственными процессами. – М.: МИРГЭМ, 1965.

Gets A.K., Onika S.G., Khalyavkin F.G.

Simulation modeling of mining operations

The article describes a simulation modeling principle of mining operations based on gate circuits of resource transformation. The proposed principle can be used for simulation modeling of various (continuous or discrete) technological mining operations with deterministic or stochastic nature.

Поступила в редакцию 10.06.2016 г.

УДК 622.281.4-0.27.253(047.1)(476)

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА EXAMINE 2D ДЛЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

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

В статье рассмотрен пример использования программного комплекса Examine 2D для быстрого численного расчета и геомеханического анализа напряженного состояния массива горных пород в приконтурной зоне горных выработок на большой глубине.

Введение

Канадский программный комплекс Examine 2D разработан для анализа плоских упругих напряжений, непосредственно заданных на геометрическом контуре подземных горных выработок. Он предназначен для быстрого интерактивного (диалогового) и легкого использования, являясь идеальным инструментом осуществления численного параметрического анализа напряжения в геотехническом контексте [1, 2].

В статье обозначены особенности и философия использования программы, рассмотрены упрощенные примеры расчетов для более ясного понимания ее возможного использования в практических расчетах.

Основная часть

Сущность рассматриваемых горнотехнических задач состоит в анализе поведения горного массива при производстве очистных работ на больших глубинах.

Математическая модель поведения породного массива может быть представлена системой дифференциальных уравнений, которые предположительно адекватно отражают реальное поведение объекта в пространстве и во времени. Главной задачей дальнейшей реализации модели поведения горного массива является выбор расчетной схемы.

Задача описания напряженно-деформируемого состояния (НДС) массива с большей или меньшей степенью приближения может рассматриваться как в двумерной, так и в трехмерной постановке.

Для одиночных и параллельно расположенных выработок в поперечном разрезе целесообразно рассматривать задачи НДС в двумерной вертикальной плоскости. Выработку можно считать протяженной при определении соотношения ее длины и ширины (максимальном расстоянии между внутренними точками поперечного сечения).

Особенностью программы Examine 2D является использование численного решения не конкретной задачи, а решение задачи в обобщенном виде при произвольном положении в горном массиве и обобщенных параметрах как выработки, так и пласта, результирующих ограничениях по параметрам пласта, видам и размерам выработок, критериям отказа горного массива и др. Само решение задачи в этой программе в явном виде не приводится. Программа представлена так, что текстом программы и общим окном управления для решения задачи задаются конкретные данные и ограничения, а интересующие нас напряжения, индуцированные в плоскости анализа (т.е. в разрезе пласта), можно находить как результат влияния контурных напряжений (на границах пласта).

Перед пуском программы важно осмыслить постановку задачи, предположения и результирующие ограничения, заложенные в анализ программы.

Программа предполагает быстрое и простое использование инструментария параметрического анализа для изучения влияния геометрии объекта и изменчивости напряжений в горном массиве после проходки горных выработок.

В качестве инструмента интерпретации для результатов моделирования выбран девиатор напряжений (разница главных напряжений) вокруг горной выработки, чтобы дать количественную оценку фактора силы в соответствии с заданным пользователем критерием отказа для горного массива. Величина векторов напряжений и формы деформирования границ массива (и выработок) могут быть построены программой, чтобы проиллюстрировать общие тенденции деформирования массива.

Предположение о плоской деформации означает, что моделируемая горная выработка имеет условно бесконечную длину, нормальную к плоскости ее поперечного сечения.

На практике, если длина выработки меньше пятикратной ее ширины, величина расчетных напряжений показывает некоторое увеличение реального напряжения в забое (туннеле) выработки, которые в данном случае не принимаются во внимание. Это увеличение становится более выраженным, если длина выработки становится соизмеримой с размерами поперечного сечения.

Пока эффект плоского расчета сохраняется в памяти, анализ результатов расчета может дать полезное понимание тенденций поведения горного массива для данного случая.

В программе расчета рассматривается упругий режим в предположении, что породный массив однороден и изотропен или поперечно изотропен и линейно-упругий. Очевидно, что большинство горных пород не обладают ни одним из этих свойств. Тем не менее, осуществление моделирования полезно, т.к. позволяет выбрать вариант оптимального сечения выработки с учетом перенапряжений и их возможного снятия.

Рассчитываемые программой деформации предназначены для качественной иллюстрации тенденций деформации. Фактические значения деформаций получаем в пределах сохранения упругого режима моделирования.

Практика использования программы показала, что она является разумным способом изучения влияния различных свойств горного массива на его состояние, но тем не менее ограниченным инструментом анализа, как и все численные модели она должна использоваться для лучшего понимания предмета, а не заменять здравый смысл.

Итак, программа изначально имеет возможность моделирования и анализа упругих напряжений и перемещений в однородных материалах с изотропными свойствами, возможность оценки коэффициентов прочности (перенапряжения на основе упругих результатов), используя критерии Кулона-Мора и обобщения Хука-Брауна при постоянном или гравитационном напряжении на границах модели.

Чего нельзя непосредственно сделать с помощью Examine 2D – это выполнить моделирование неоднородного (анизотропного) горного массива, податливых пластичных пород, прогрессирующего разрушения горных пород.

Тем не менее, к моделированию и расчетам необходимо подходить творчески и многие ограничения можно обойти. Например, закладку горной выработки породой можно рассматривать, с одной стороны, как горный неоднородный массив, а с другой – как своеобразное, но приведенное к эквивалентной прочности крепление горной выработки.

Пользуясь инструкцией по программе Examine 2D и приложенными к ней примерами, а также указаниями к использованию панели инструментов, содержащимися в

основном окне программы, можно моделировать много интересных и полезных задач, интересующих горных инженеров.

Покажем на примере описание геомеханического состояния однородного горного массива при моделировании в нем ведения горных работ – разработка длинными столбами для понимания механизма расчета.

Рассмотрим пример расчета механического состояния изотропного массива, в котором ведутся горные работы для 2-ух вариантов:

- первый вариант с расположением зоны ведения очистных работ на относительно небольшой глубине;
- второй – на глубине свыше 1000 м.

Эти два варианта существенно отличаются друг от друга постановкой задачи и напряженным состоянием горного массива при его разработке, что необходимо учитывать при составлении проекта производства работ. На рисунке 1 представлена рабочая зона программы с панелью управления.

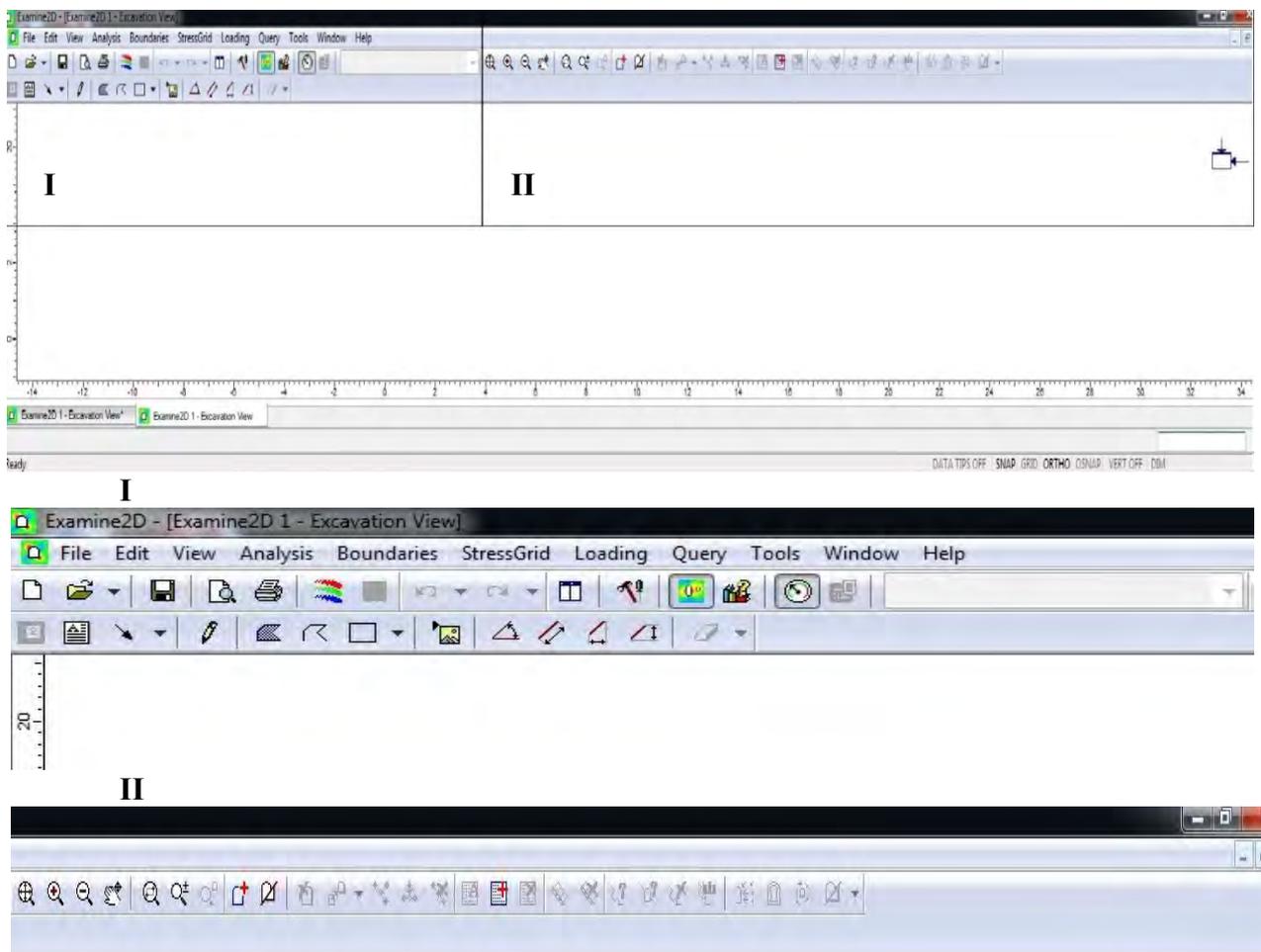


Рисунок 1. – Копия экрана с рабочей зоной программного комплекса Examine 2D

Далее, пользуясь панелью управления, продемонстрируем для первого варианта процедуру моделирования.

С помощью мыши и колеса на ней выбираем координатные оси и масштаб модели, чтобы влияние разработки не выходило за пределы горного массива, и фиксируем эти размеры нажатием левой кнопки мыши.

Потом задаем размеры лавы с помощью таблицы координат, пользуясь опцией «Boundaries», выбирая «Excavation» и задавая таблицу координат лавы (таблица 1).

Таблица 1. – Координаты лавы

Номер координаты	X	Y
1	-100	0
2	100	0
3	100	-4
4	-100	-4

Выбрав в таблице координат «Ok» автоматически получаем поле напряжений по умолчанию при использовании автосетки 40×40. Для разного типа поля напряжений дневная поверхность строится также автоматически по координатам ($x = -400, y = 200; x = 400, y = 200$).

Для выполнения расчетов необходимо предварительно задать: параметры горного объекта, используемые единицы измерения, геомеханические параметры породы, используемые расчетные зависимости поля напряжений. Все данные задаются опциями «View», «Analysis». В нашем случае были приняты: поле напряжений постоянное для первого варианта, горный массив изотропный, критерий нагрузки оценивается по Морю-Кулону. Для второго варианта – поле напряжений гравитационное. Анализ информации указан ниже в протоколе 1 и 2.

Протокол 1 – Входные данные для расчета постоянных напряжений

Project Settings

General

- Units: Metric, stress as MPa
- Boundary Element Type: Constant
- Analysis Type: Plane Strain
- Matrix Solver Type: Jacobi Bi-Conjugate Gradient

Field Stress

Type	Constant Stress
Sigma 1 (MPa)	9.00
Sigma 3 (MPa)	5.00
Sigma Z (MPa)	7.00
Angle (deg)	0.00

Rock Mass Elastic Properties

Type	Isotropic
Em (MPa)	10000.00
Poisson's Ratio	0.25

Rock Mass Strength

Type	Mohr-Coulomb
Tensile Strength (MPa)	0.30
Cohesion (MPa)	2.00
Friction Angle (deg)	50.00

Joint Strength

Type	Elastic
Joint Normal Stiffness (MPa/m)	10000.00
Joint Shear Stiffness (MPa/m)	1000.00

Advanced Joint Properties

Initial Joint Deformation	Yes
Consider Joint Aperture	No

List of All Coordinates**Stress Grid**

#	X	Y
1	-400.000	-402.000
2	400.000	-402.000
3	400.000	398.000
4	-400.000	398.000

Excavation Boundary

#	X	Y
1	-100.000	-4.000
2	100.000	-4.000
3	100.000	0.000
4	-100.000	0.000

Ground Surface

#	X	Y
1	-400.000	200.000
2	400.000	200.000

Протокол 2 – Входные данные для расчета гравитационных напряжений**Project Settings****General**

- Units: Metric, stress as kPa
- Number of Excavation Elements: 68
- Number of Surface Elements: 132
- Boundary Element Type: Constant
- Analysis Type: Plane Strain
- Matrix Solver Type: Jacobi Bi-Conjugate Gradient

Field Stress

Type	Gravitational Stress
Ground Surface Elevation (m)	Defined by boundary
Overburden Unit Weight (kN/m ³)	26.000
Horizontal Stress Ratio	1.50
Out Of Plane Stress Ratio	1.20

Rock Mass Elastic Properties

Type	Isotropic
Em (kPa)	10000000.00
Poisson's Ratio	0.25

Rock Mass Strength

Type	Mohr-Coulomb
Tensile Strength (kPa)	300.00
Cohesion (kPa)	2000.00
Friction Angle (deg)	50.00

Joint Strength

Type	Elastic
Joint Normal Stiffness (kPa/m)	10000.00
Joint Shear Stiffness (kPa/m)	1000.00

Advanced Joint Properties

Initial Joint Deformation	Yes
Consider Joint Aperture	No

List of All Coordinates**Stress Grid**

#	X	Y
1	-400.000	-402.000
2	400.000	-402.000
3	400.000	398.000
4	-400.000	398.000

Excavation Boundary

#	X	Y
1	-100.000	-4.000
2	100.000	-4.000
3	100.000	0.000
4	-100.000	0.000

Ground Surface

#	X	Y
1	-400.000	200.000
2	400.000	200.000

Результаты расчета поля напряжений приведены на рисунках 2 и 3. Здесь представлена картина некоторых видов напряжений по обоим вариантам. Практически мгновенно можно определить 16 разнообразных прочностных и деформационных характеристик напряженного состояния горного массива.

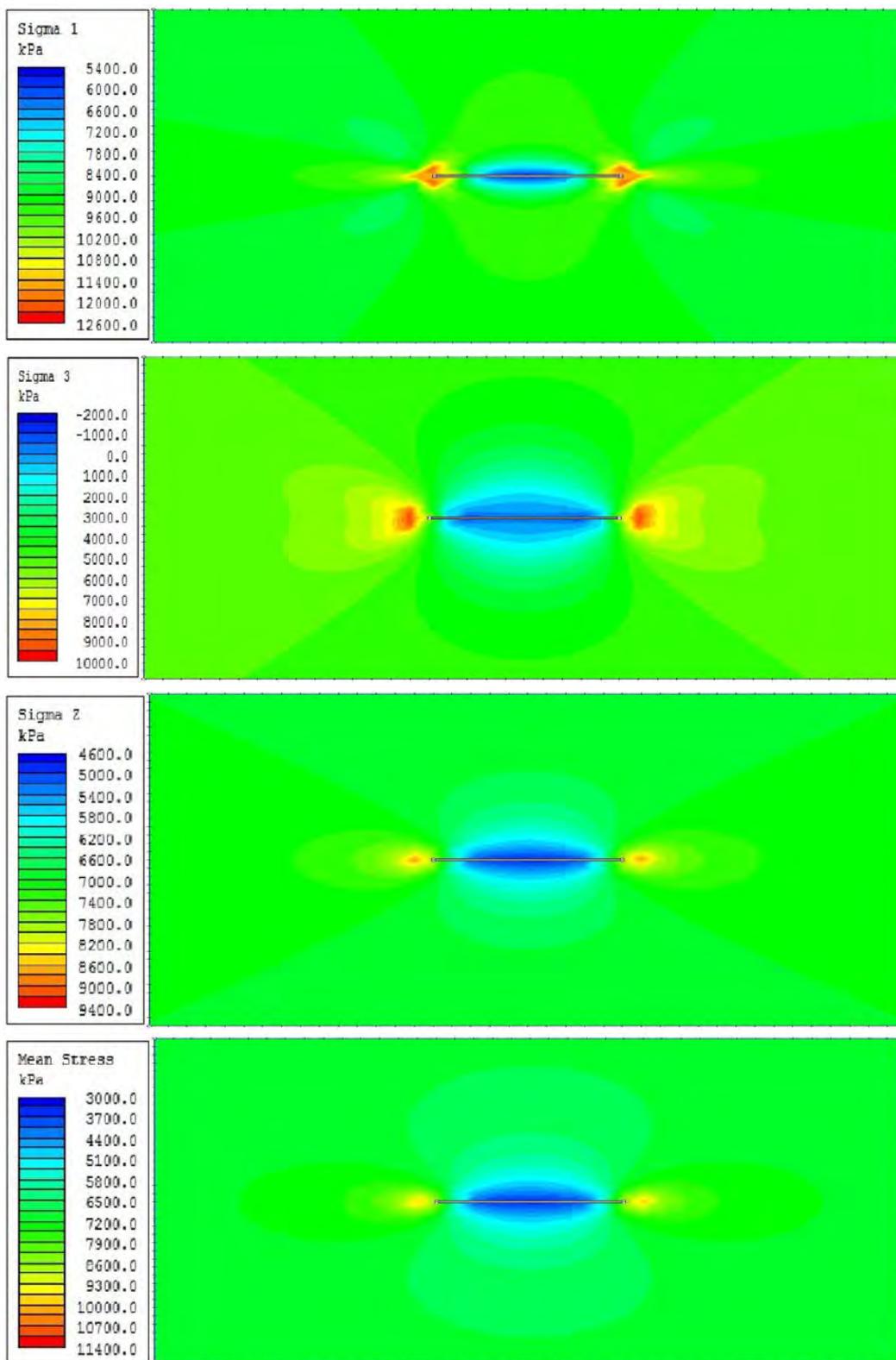


Рисунок 2. – Результаты расчета характеристик постоянного поля напряжений

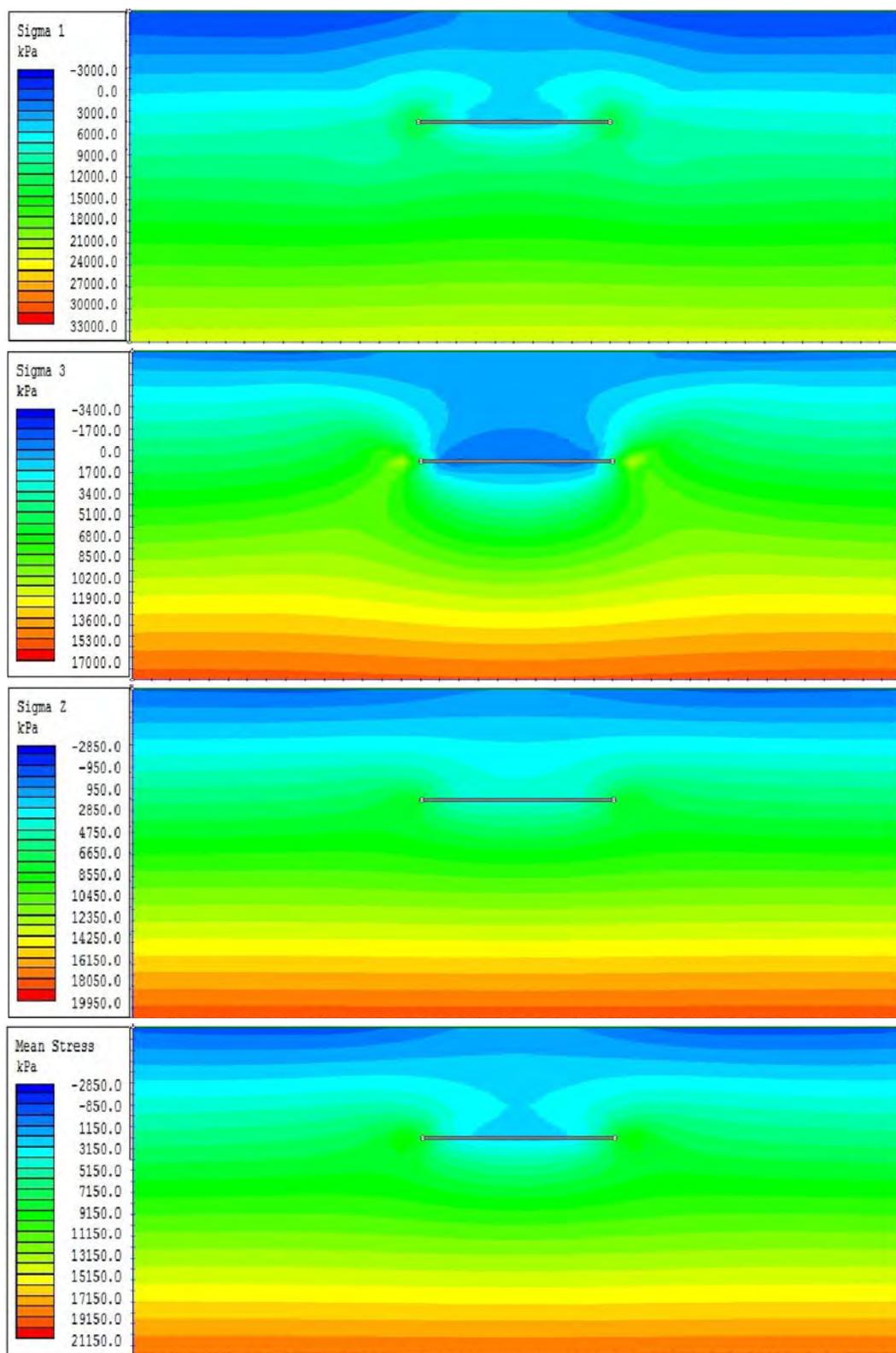


Рисунок 3. – Результаты расчета характеристик гравитационного поля напряжений

С помощью опции «Loading» можно редактировать нагрузки (изменять, исправлять, задавать новые нагрузки).

Опция «Query» позволяет изменять свойства горных пород, вид границ горных выработок и их количество.

Опция «Tools» (инструментарий) имеет много инструментов, облегчающих редактирование различных проблем.

Заключение

Программный комплекс Examine 2D предназначен для быстрого и простого использования его инструментария для изучения пространства изменчивости геомеханических характеристик поведения горного массива (напряжений, перемещений, деформаций, характера нагрузок и др.)

Программа предполагает, что горная выработка имеет бесконечную длину, которая перпендикулярна ее поперечному сечению. Отсюда вытекает, что программа решает задачи в плоской (двумерной) постановке. Однако, учитывая ее эффективность, заключающуюся в высокой скорости рассмотрения вариантов постановок различных схем и вариаций геомеханических свойств, можно быстро «нащупать» тенденции в развитии деформаций горного массива и выбрать определяющий вариант. Это дает возможность постановки и изучения задачи в более точной форме.

Получаемые смещения, деформации, различные виды напряжений полезны для иллюстрации качественного их развития, характеристики региональных тенденций. В действительности это лишь малая составляющая текущего измерения перемещений. Расчетные смещения напрямую зависят от величины модуля деформации горного массива. Практика использования данной программы показывает, что можно быстро выявить влияние каждого параметра породы на различные виды напряжений и деформаций весьма оперативно, что трудно переоценить.

Examine 2D является мощным, но тем не менее ограниченным инструментом в анализе геомеханического состояния изучения объекта. Как и все численные модели, программа должна использоваться для повышения качества и дополнения в изучении объекта моделирования.

Подводя итоги возможностей использования данной программы, отмечаем возможность моделирования и анализа одного материала (т.е. не многослойной среды) с изотропными свойствами, оценки упругих напряжений, оценки прочности материала на основе использования критерия отказа Кулона-Мора или обобщения Хука-Брауна, постоянного или гравитационного поля нагрузок, интерактивного моделирования и параметрического анализа.

Как видно из рассмотренного примера моделирования сразу после установления границ и сетки напряжений программа автоматически и практически мгновенно вычисляет все характеристики поля напряжений. Можно сколько угодно менять границы горного объекта и горных выработок и изменять параметры горного массива, расчеты по программе в режиме реального времени выполняются без задержек. Значения характеристик поля можно получить в любой точке поля. Результаты расчетов можно экспортировать в Excel. А исходные данные импортировать в файл с расширением dxf (AutoCAD) и др. После выявления тенденции поведения поля напряжений, для полноценного анализа ситуации напряженного поля в дальнейшем следует использовать программные комплексы PHASE 2, FLEX PDF и др.

Общие сведения о проекте помещаются в таблицу Project Summary, в которую включаются: название проекта, автор, компания (организация), данные проекта, анализ и комментарии. Эта информация по умолчанию появляется в резюме проекта и может

появляться в новых файлах. Найти эту опцию можно в меню «Tools», подменю «Text Box». Пример таблицы приведен ниже (таблица 2).

Таблица 2. – Project Summary (Краткое описание проекта)

Характер проекта	Моделирование горного массива
Название проекта	Отработка сближенных пластов
Анализ	Анализ напряжений и деформации
Авторы	Усенко В.С., Липницкий Н.А., Ильин Д.А.
Организация	ООО «БХПЭнерго»
Дата создания	Апрель, 2016
Примечания	Рассматривается в качестве примера использования программы Examine 2D ver. 7

Расширение области применения программы Examine 2D возможно при творческом подходе к использованию ее свойств и возможностей.

Например, программный комплекс Examine 2D можно использовать для моделирования закладки выработанного пространства, творчески интерпретируя геомеханическую ситуацию в зоне ведения закладочных работ.

Можно искать методику моделирования многослойной среды, приводя ее к эквивалентной однородной среде. Можно искать и другие подходы, имея в виду, что пользование программой весьма простое и дает мгновенные результаты расчетов.

Список цитированных источников

1. **Crouch, S.L.** Boundary element methods in solid mechanics / S.L. Crouch, A.M. Starfield // George All & Unwin. – London, 1983.
2. **Hoek, E.** Hoek-Brown failure criterion / C. Carranza-Torres, B. Corkum / NARMS-TAC Conference. – Toronto, 2002. – P. 267-273.

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

An example use of Examine 2D software system for geomechanics calculations

The article presents an example use of Examine 2D software system for prompt numerical computation and geomechanics analysis of stress condition of rock mass in the border zone of deep mine workings.

Поступила в редакцию 17.05.2016 г.

УДК 622.363.2, 551.49

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ МЕЗО-КАЙНОЗОЙСКИХ И ПАЛЕОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО УЧАСТКА ПЕТРИКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Кацемба С.Н., Злебова А.Е., Воронцова И.В., Иванов Д.Л. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

В данной статье в стратиграфической последовательности приводятся объемы выполненных гидрогеологических работ на Северном участке Петриковского месторождения с целью изучения водоносных (и слабоводоносных) горизонтов (и комплексов) зоны активного водообмена и водоупорных локально водоносных (слабоводоносных) горизонтов зоны замедленного (и весьма замедленного) водообмена, развитых в геологическом разрезе территории исследований.

Введение

Все геологические науки, в том числе и гидрогеологические, развиваются тремя взаимосвязанными путями – изучением гидрогеологических условий в их естественной обстановке (полевых условиях), изучением этих процессов и их моделирования в условиях лабораторий и теоретическим обобщением результатов. Проверая, дополняя и корректируя друг друга, эти три методологические направления служат главным двигателем науки, и в каждом частном случае уровень ее развития зависит от многообразия и совершенства применяемых методов изучения, а также от полноты и точности информации о предмете исследований.

В статье приводятся виды поисково-съёмочных, геологоразведочных, гидрогеологических, инженерно-геологических и научно-исследовательских работ, имеющих отношение к изучению гидрогеологических условий Северного участка Петриковского месторождения, по результатам (анализу) которых в последующем будут охарактеризованы гидрогеологические условия данного участка и прилегающих территорий.

Гидрогеологическая изученность Северного участка Петриковского месторождения представлена для мезо-кайнозойских* и палеозойских отложений** отдельно, учитывая их разные природные условия залегания, формирования и водообмена.

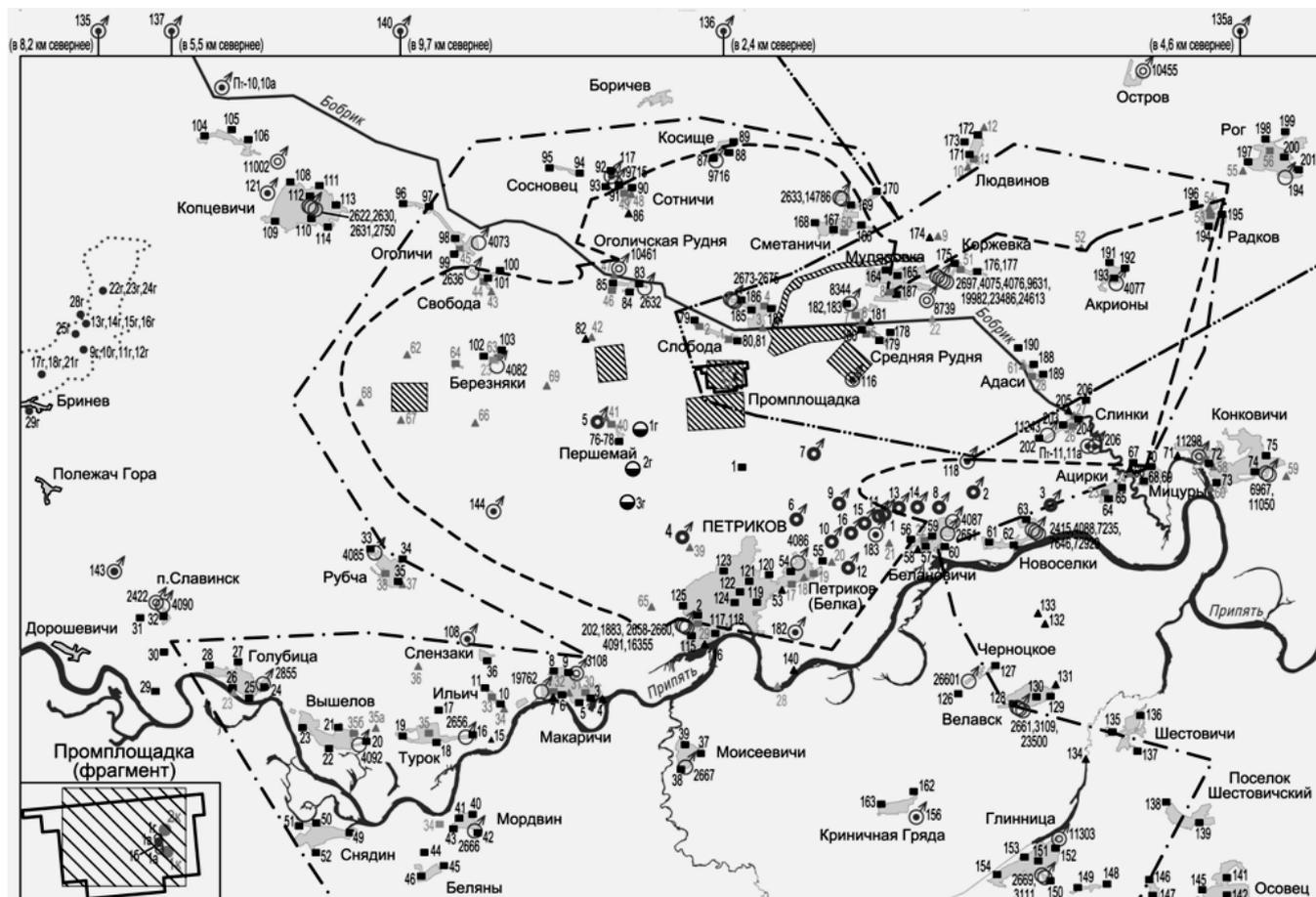
Гидрогеологическая информация представлена на картах гидрогеологической изученности (фактического материала) Северного участка Петриковского месторождения (рисунки 1, 2), к которым прилагается легенда (условные обозначения).

Гидрогеологическая информация рассмотрена согласно условиям залегания водоносных (и слабоводоносных) горизонтов (комплексов) в соответствии со сводной легендой для гидрогеологических карт масштаба 1:200000 Белорусской серии листов, утвержденной гидрогеологической секцией Мингео СССР при ВСЕГИНГЕО (Протокол № 5) от 5 июня 1986 г. [1], и стратиграфической схемой докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси, рассмотренной и утвержденной Приказом Департамента по геологии

* В состав мезо-кайнозойских отложений входят отложения четвертичной, неогеновой и палеогеновой систем кайнозойской эратемы и отложения меловой, юрской и триасовой систем мезозойской эратемы в соответствии с [1-3];

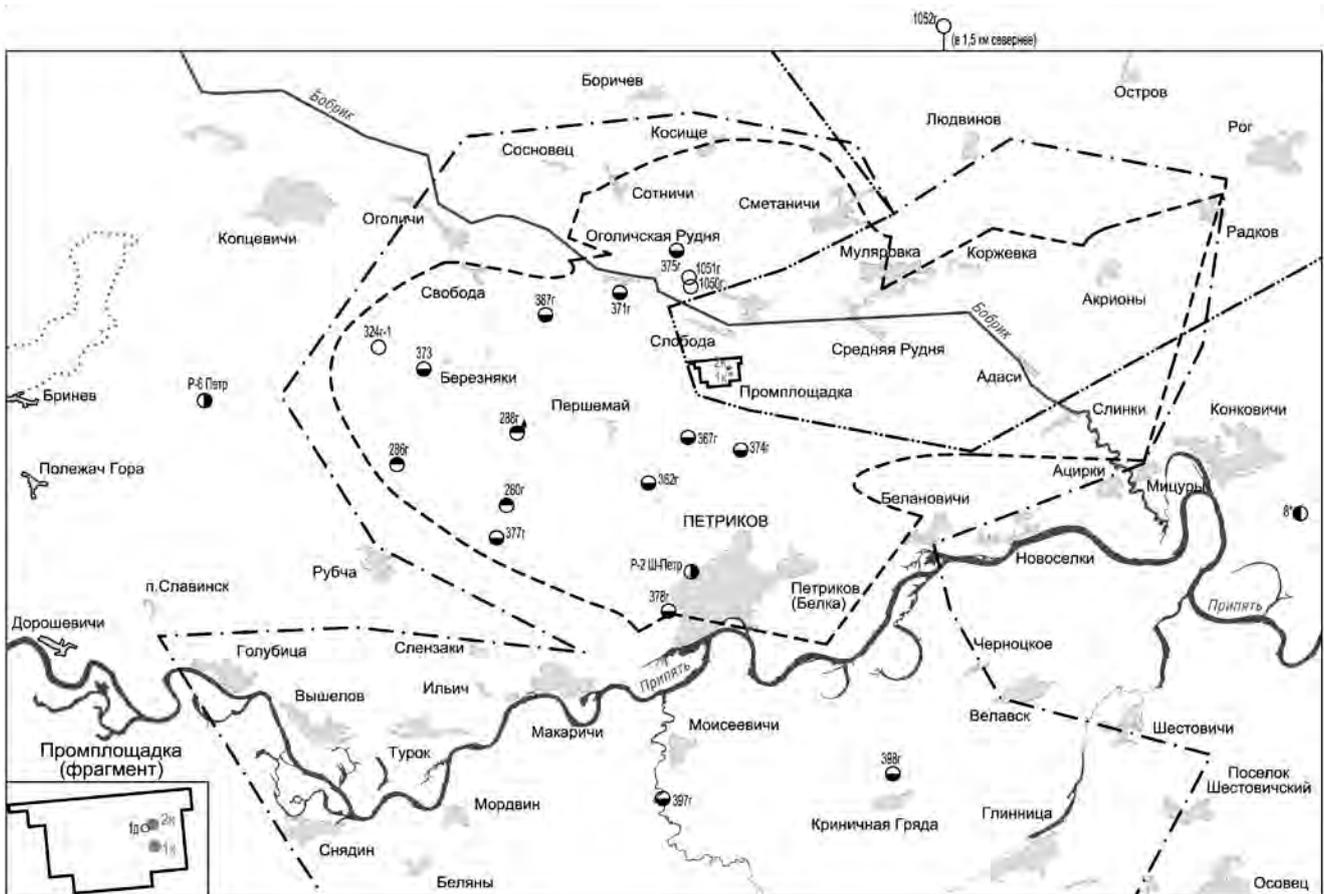
** в состав палеозойских отложений входят отложения пермской, каменноугольной и девонской систем палеозойской эратемы в соответствии с [1-3].

Минприроды РБ № 49 от 22 сентября 2010 г. [2], с учетом материалов и рекомендаций монографии «Геология Беларуси», изданной в Институте геологических наук НАНБ, под редакцией А.С. Махнача, Р.Г. Гарецкого, А.В. Матвеева и др., в 2001 году [3].



- — — граница горного отвода калийного горизонта IV-п Северного участка Петриковского месторождения;
- - - - граница развития калийного горизонта IV-п Северного участка Петриковского месторождения;
- — — граница горного отвода калийного горизонта VI-п Северного участка Петриковского месторождения;
- ⋯⋯⋯ граница Бриневского месторождения бурых углей;
- ▲ – колодцы и пункты обследования поверхностных вод, дата обследования – сентябрь 1972 г. [4];
- ▲ – колодцы и пункты обследования поверхностных вод, дата обследования – 1997-1998 гг. [5];
- ▲ – колодцы и пункты обследования поверхностных вод, дата обследования – март, июль 2013 г. [6];
- 15 ♂ [7], 21г • [8], 121 ♂ [5] – гидрогеологические поисково-разведочные скважины, в том числе опробованные водозаборные;
- 10461 ♂ [5], 24613 ♂ [4] – гидрогеологические водозаборные эксплуатационные скважины;
- 16 ○ [9] – гидрогеологические скважины, пробуренные на промплощадке Петриковского ГОК;
- ▭ – промплощадка; ▨ – участки проведения инженерно-геологических изысканий;
- – населенные пункты; ~ – гидрография; ■ – колодец и его номер;
- ▲ – точка обследования водопункта и ее номер

Рисунок 1. – Карта гидрогеологической изученности мезо-кайнозойских отложений Северного участка Петриковского месторождения и прилегающих территорий



- 280г, 1050г
 ● [10], ○ [11] – гидрогеологические скважины, пробуренные в процессе разведки и доразведки месторождения;
 Р-2Ш-Петр, 8*
 ● [12], ● [13] – скважины, пробуренные на нефть и газ;
 1д, 1к
 ○, ● [9] – гидрогеологическая и контрольно-стволовые скважины, пробуренные на промплощадке Петриковского ГОК

Рисунок 2. – Карта гидрогеологической изученности палеозойских отложений Северного участка Петриковского месторождения и прилегающих территорий

Гидрогеологическая изученность мезо-кайнозойских отложений Северного участка Петриковского месторождения и прилегающих территорий

В геологическом разрезе мезо-кайнозойских отложений в соответствии с [1, 2] выделены следующие водоносные и слабоводоносные комплексы, развитые на Северном участке Петриковского месторождения и прилегающих к нему территориях:

- водоносный комплекс четвертичных отложений (Q);
- водоносный (и слабоводоносный) терригенный комплекс неогеновых отложений (N_1);
- водоносный терригенный комплекс палеогеновых отложений (P_{2+3});
- слабоводоносный карбонатный и водоносный карбонатно-терригенный комплекс меловых отложений (K_2);
- слабоводоносный (и водоносный) терригенно-карбонатный и водоносный терригенный комплекс юрских отложений (J);
- водоносный терригенный горизонт нижнетриасовых отложений (T_1).

Водоносный комплекс четвертичных отложений кайнозойской эратемы (Q).

Анализируя объемы выполненных работ по исследованию мезо-кайнозойских отложений Северного участка Петриковского месторождения, однозначно можно сказать, что наибольшему инженерно-гидрогеологическому изучению подлежали кайнозойские отложения четвертичного возраста, ввиду их близкого расположения к земной поверхности.

Наиболее изученными среди четвертичных отложений являются водоносные горизонты: голоценовых болотных отложений, голоценовых аллювиальных пойменных отложений, поозерских озерно-аллювиальных отложений, днепровских надморенных водно-ледниковых отложений и березинских-днепровских водно-ледниковых отложений.

Первоначально эти отложения были изучены геолого-съемочными работами различных масштабов, приоритетно в масштабе 1:50000, проведенными на территории исследований с конца сороковых годов и включительно по семидесятые годы прошлого столетия. По крайней мере, наибольший объем выполненных комплексных геолого-гидрогеологических и инженерно-геологических работ пришелся именно на этот тридцатилетний период, который связан с комплексным проведением мелиорации земель, их сельскохозяйственным освоением и достижением на осушенных мелиорированных землях проектной урожайности согласно «Долговременной программе мелиорации земель», одобренной октябрьским Пленумом ЦК КПСС в 1984 году.

Самая верхняя часть четвертичных отложений, к которой приурочены водоносные горизонты, залегающие первыми от земной поверхности, широко изучена в 1972 году в период производства геологоразведочных работ на Петриковском месторождении с подсчетом запасов по промышленным категориям по состоянию на 1 октября 1974 года.

В то время при натурном обследовании территории, проведенном Белорусской геологоразведочной экспедицией (БГРЭ), были исследованы поверхностные воды (реки, мелиоративные каналы, родники) и в населенных пунктах обследованы колодцы, с замерами уровней воды и отбором проб на химический анализ.

Также широкому гидрогеологическому исследованию подлежали водоносные горизонты четвертичных отложений при гидрогеологическом и инженерно-геологическом доизучении территории листов (Житковичи и Петриков), проведенном в 1995-2003 годах, в масштабе 1:200000. В процессе этой работы Белорусской гидрогеологической экспедицией (БГГЭ) была выполнена рекогносцировка территории и обследованы колодцы и поверхностные водотоки (реки, мелиоративные каналы и т.п.), а также пробурено 19 скважин глубиной от 9,8 м до 65,0 м, в которых опробованы водоносные горизонты голоценовых аллювиальных пойменных и поозерских озерно-аллювиальных отложений, залегающих первыми от земной поверхности, водоносные горизонты днепровских надморенных отложений, залегающие также первыми от земной поверхности или перекрытые более молодыми осадками, и водоносный горизонт березинско-днепровских водно-ледниковых отложений, подстилающийся озерно-аллювиальными осадками голоцена либо надморенными отложениями днепровского оледенения.

Отдельно водоносный днепровский надморенный водно-ледниковый горизонт четвертичных отложений также был изучен в 1953 и 1962 годах в период бурения двух первых водозаборных разведочно-эксплуатационных скважин глубиной 32,0 м и 40,0 м в населенных пунктах Копцевичи и Слобода соответственно и в 1996-2001 годах в период детальной разведки Бриневского бурогоугольного месторождения пятью скважинами глубиной от 22,0 м до 39,0 м (западная часть района исследований) – рисунок 1.

Значительный объем изучения слабоводоносного голоценового болотного горизонта, водоносного голоценового аллювиального пойменного горизонта, водоносного поозерского озерно-аллювиального горизонта и днепровского надморенного водноледникового горизонта пришелся и на современный период.

В 2012-2015 годах ОАО «Белгорхимпром» при проведении инженерно-геологических изысканий было пробурено несколько сотен скважин глубиной, в основном, от 3,0 м до 20,0 м под строительство отдельных инженерных площадок (промплощадка Петриковского горно-обогатительного комплекса (ГОК), солеотвал, шламохранилище, водохранилище технической воды и других объектов Петриковского ГОК).

Кроме того, в 2013 году в рамках работы по оценке воздействия окружающей среды были выполнены инвентаризация колодцев и обследование поверхностных водоемов (реки Припять, Бобрик и их притоки, старицы, рукава, родники, каналы).

Водоносный (и слабоводоносный) терригенный комплекс неогеновых отложений кайнозойской эратемы (N_1) включает слабоводоносный антопольский и водоносный бриневский терригенные горизонты.

Слабоводоносный антопольский терригенный горизонт на Северном участке изучен слабо и исключительно в западной части района, за пределами горного отвода калийного горизонта IV-п. В 1997 году в период разведки Бриневского месторождения бурых углей было пробурено пять скважин глубиной от 36,0 м до 56,0 м.

Водоносный бриневский терригенный горизонт в связи с его высокой водообильностью и использованием в хозяйственно-питьевых целях исследован гораздо значительнее.

Так, первые 18 водозаборных скважин глубиной от 43,0 м до 68,5 м были пробурены еще в шестидесятые годы и в начале семидесятых годов прошлого столетия в населенных пунктах: Белановичах, Глинице, Конковичах, Косищах, Муляровке, Новоселках, Оголичах, Сметаничах, Ср. Рудне и Черноцком.

Затем в 1997 году данный горизонт опробовался в процессе разведки Бриневского бурого угольного месторождения восемью скважинами глубиной от 57,0 м до 126,0 м, а в 2012 году он изучался совместно с четвертичным поозерским озерно-аллювиальным горизонтом на промплощадке Петриковского ГОК одной скважиной глубиной 37,7 м с целью определения водопритоков в шахтные стволы при их проходке.

Водоносный терригенный комплекс палеогеновых отложений кайнозойской эратемы (P_{2+3}) включает три водоносных горизонта: 1 – киевский и харьковский терригенный горизонт; 2 – харьковский терригенный горизонт; 3 – киевский терригенный горизонт.

Водоносный киевский и харьковский терригенный горизонт заслуживает особого внимания как наиболее изученный из серии водоносных горизонтов палеогена.

В 1979 году были проведены поисково-разведочные работы по выявлению и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в результате которых данный горизонт был опробован в не менее, чем 20 гидрогеологических скважинах глубиной от 103,0 м до 130,0 м, которые в наши дни используются для водоснабжения г. Петрикова (водозабор «Белка») и его окрестностей. Но использование названного горизонта в качестве хозяйственно-питьевого водоснабжения началось еще в шестидесятых годах двадцатого столетия, когда были пробурены первые водозаборные эксплуатационные скважины глубиной от 62,5 м до 90,21 м для обеспечения подземной водой населенных пунктов: Белка, Велавск, Муляровка, Новоселки и других.

Помимо того, горизонт изучался на промплощадке Петриковского ГОК в 2012 году гидрогеологической скважиной глубиной 89,0 м, расположенной в непосред-

ственной близости от шахтных стволов. И в 2015 году для наблюдений за уровнем подземной воды в процессе проходки шахтных стволов способом замораживания породного массива было пробурено три гидрогеологические наблюдательные скважины, две из которых глубиной по 84,0 м пробурены внутри шахтных стволов и одна глубиной 85,5 м – между стволами.

Водоносный харьковский терригенный горизонт изучен несколько слабее и, в основном, водозаборными эксплуатационными скважинами глубиной от 63,0 м до 81,0 м, пробуренными в начале пятидесятих годов прошлого века в г. Петрикове и д. Макаричи.

Водоносный киевский терригенный горизонт в свое время с середины пятидесятих годов пользовался большим спросом для обеспечения водой населения и практически в каждой деревне (Акрионы, Березники, Вышелов, Голубица, Копцевичи, Моисеевичи, Мордвин, Муляровка, Новоселки, Оголичская Рудня, Рог, Рубча, Славинск, Слобода, Турок и т.д.) существовали водозаборные скважины разной глубины от 63,3 м до 100,0 м.

Слабоводоносный карбонатный и водоносный карбонатно-терригенный комплекс меловых отложений мезозойской эратемы (К₂) включает слабоводоносные карбонатные коньякский и туронский горизонты и водоносный сеноманский карбонатно-терригенный горизонт, которые в районе исследований (все три горизонта) изучены слабее предыдущих.

Слабоводоносный карбонатный коньякский горизонт на Северном участке не вскрыт ни одной скважиной. А слабоводоносный туронский карбонатный горизонт исследован двумя гидрогеологическими скважинами, одна из которых глубиной 230,0 м пробурена в 1972 году при проведении геологоразведочных работ на Петриковском месторождении, связанных с подсчетом запасов по промышленным категориям по состоянию на 1 октября 1974 года, другая – глубиной 137,0 м пробурена в 2012 году на промплощадке Петриковского ГОК для определения величины притока подземной воды в шахтные стволы при их проходке.

Водоносный сеноманский карбонатно-терригенный горизонт на территории исследований изучен совместно со слабоводоносным келловейским терригенно-карбонатным горизонтом и водоносным батским терригенным горизонтом лишь единичной гидрогеологической скважиной глубиной 262,0 м, опробованной в 2012 году на промплощадке Петриковского ГОК, и тремя гидрогеологическими наблюдательными скважинами, пробуренными 2015 году на промплощадке внутри скипового и клетевого шахтных стволов (две скважины глубиной по 202,0 м каждая) и между стволами (третья скважина глубиной 203,5 м) для осуществления наблюдений за уровнем воды в процессе заморозки горного массива (без проведения опытно-фильтрационных работ (ОФР)).

Слабоводоносный (и водоносный) терригенно-карбонатный и водоносный терригенный комплекс юрских отложений мезозойской эратемы (J) включает водоносный оксфордский, слабоводоносный (водоносный) келловейский терригенно-карбонатный горизонты и водоносный батский терригенный горизонт.

Водоносный оксфордский терригенно-карбонатный горизонт на территории исследований не изучен, а слабоводоносный (водоносный) келловейский терригенно-карбонатный горизонт изучен по данным откачек, проведенных в двух скважинах глубиной 230,0 и 129,6 м. Одна скважина пробурена в 1972 году на «каверну» в период геологоразведочных работ на Петриковском месторождении с подсчетом запасов по состоянию на 1 октября 1974 года. Вторая скважина пробурена в 1999 году при прове-

дении работ по доизучению территории листов (Житковичи и Петриков) за границей горного отвода калийного горизонта IV-п Северного участка Петриковского месторождения.

Водоносный батский терригенный горизонт изучен также в процессе производства работ по доизучению листов (Житковичи и Петриков) по результатам ОФР, проведенных в двух скважинах глубиной 213,0 м и 370,0 м, пробуренных в 1999 году.

Водоносный нижнетриасовый терригенный горизонт мезозойской эратемы (Т₁) изучен двумя скважинами, пробуренными БГРЭ в 1972 и 1973 годах глубиной 269,4 и 296,6 м на каверну при проведении геологоразведочных работ на Петриковском месторождении с подсчетом запасов по промышленным категориям по состоянию на 1 октября 1974 года, и – одной скважиной, пробуренной БГГЭ в 1999 году при доизучении территории листов (Житковичи и Петриков) на глубину 315,0 м.

Гидрогеологическая изученность палеозойских отложений

При гидрогеологическом изучении палеозойских отложений, повсеместно развитых в геологическом разрезе Северного участка Петриковского месторождения калийных солей, основное внимание уделялось надсолевой глинисто-мергелистой толще (ГМТ), перекрывающей верхнесоленосные породы верхнего девона, которые служат водозащитой при отработке полезного ископаемого подземным способом.

Гидрогеологическая изученность палеозойских отложений (включены отложения пермской, нижнекаменноугольной и девонской систем палеозойской эратемы) рассмотрена в соответствии с условиями залегания слабоводоносных и водоупорных локально водоносных (слабоводоносных) комплексов согласно [1-3].

Слабоводоносный пермский карбонатно-терригенный комплекс развит исключительно на востоке (за границей горного отвода калийного горизонта IV-п) и опробован в 1989 году одной скважиной глубиной 1092,0 м в открытом стволе, в интервале 802,0-830,0 м, в период проведения «Союзбургазом» разведки Конковичской площади.

Водоупорный локально водоносный нижнекаменноугольный карбонатно-терригенный комплекс на территории исследований изучен по результатам только одной скважины глубиной 663,6 м, пробуренной в 1972 году при производстве работ на Петриковском месторождении с подсчетом запасов по состоянию на 1 октября 1974 года.

Водоупорный локально водоносный (слабоводоносный) верхнедевонский карбонатно-терригенный комплекс в стратиграфическом отношении включает отложения верхне- и нижнестаробинских слоев полесского надгоризонта старобинского горизонта и любанских и осовецких слоев стрешинского горизонта. В литологическом составе геологический разрез преимущественно представлен глинисто-мергелистыми отложениями.

Первые исследования названного комплекса пришлось на период геологоразведочных работ на Петриковском месторождении по подсчету запасов по состоянию на 1 октября 1974 года. В этот период (1969-1973 годы) было пробурено 12 скважин глубиной от 680,8 м до 1380,0 м и, в целом, опробовано 32 геолого-литологических интервала.

Далее гидрогеологические работы по изучению данного гидрогеологического подразделения Северного участка Петриковского месторождения возобновились почти спустя 40 лет и связаны были с реализацией инвестиционного проекта по промышленной разработке Петриковского месторождения калийных солей в Гомельской области, строительством и вводом в эксплуатацию горно-обоганительного комплекса (ГОК)

мощностью не менее 1,5 млн тонн хлорида калия в год. В связи с поставленной задачей в рамках данного инвестиционного проекта было принято решение о проведении геологоразведочных работ по доразведке запасов калийных солей Петриковского месторождения с переоценкой (подсчетом) запасов по состоянию на 01.01.2013 года.

В период этих работ (2012-2013 гг.) были пробурены четыре гидрогеологические скважины глубиной от 510,0 м до 735,0 м, в которых испытано восемь интервалов.

В том же 2013 году на промплощадке Петриковского ГОК в непосредственной близости от местоположения скипового и клетового шахтных стволов была пробурена гидрогеологическая скважина глубиной 521,0 м, в которой в открытом стволе путем наращивания было испытано (методом желонирования и откачки погружным насосом) три интервала надсолевой ГМТ на предмет ее обводненности и получения фильтрационных параметров, необходимых для выбора глубины заморозки и расчетов водопритоков.

Если рассматривать гидрогеологическую изученность палеозойских отложений верхнедевонских надсолевых карбонатно-терригенных отложений в геологическом разрезе, то она распределяется следующим образом.

Водоупорный локально водоносный (слабоводоносный) полесский карбонатно-терригенный горизонт изучен в 1972 году в рамках геологоразведочных работ на Петриковском месторождении с подсчетом запасов по категориям по состоянию на 1 октября 1974 г., в 2012 году в период доразведки запасов калийных солей Петриковского месторождения, проведенных в 2012-2013 годах, с переоценкой (подсчетом) запасов по состоянию на 01.01.2013 года, и в 2013 году на промплощадке Петриковского ГОК.

При этом, в разные годы исследований было опробовано десять скважин в интервале от 283,7 м до 530,0 м. В шести скважинах опробование выполнялось в одном интервале, в трех – горизонт испытывался в двух, трех и четырех интервалах прямым ходом с наращиванием, в одной скважине опробованы два интервала прямым ходом с наращиванием, и для проверки гидрогеологических параметров продублирован еще один обратный ход. В целом получены результаты по 18 опробованным литологическим интервалам.

Водоупорный локально водоносный (слабоводоносный) любанский карбонатно-терригенный горизонт изучен шестью скважинами, пробуренными на объекте исследований, в которых испытано прямым ходом семь литологических интервалов от 439,7 м до 627,6 м, и обратным ходом опробовался один интервал.

Совместно опробованные водоупорные локально водоносные (слабоводоносные) полесский и любанский карбонатно-терригенные горизонты изучены семью скважинами методом желонирования в открытом стволе. Прямым ходом исследовано десять литологических интервалов от 283,7 м до 630,0 м, при этом с наращиванием (в пределах стратиграфических слоев) опробована одна скважина, и с уточнением результатов желонирования (обратным ходом) – тоже одна скважина.

Совместно опробованные водоупорные локально водоносные (слабоводоносные) полесский, любанский и осовецкий карбонатно-терригенные горизонты исследованы пятью скважинами методом желонирования прямым ходом. Всего испытано пять литологических интервалов глубиной от 283,7 м до 540,0 м.

Совместно опробованные водоупорные локально водоносные (слабоводоносные) любанский и осовецкий карбонатно-терригенные горизонты изучены в четырех скважинах с испытанием пяти интервалов от 439,7 м до 735,0 м методом желонирования прямым ходом.

Слабоводоносный средне-верхнедевонский (подсолевой) карбонатно-терригенный комплекс объединяет отложения задонского надгоризонта и полоцкого горизонта.

Ниже надсолевых пород геологический разрез практически не изучен. Исключения составляют результаты двух скважин, опробованных в 1969 году в период глубокого бурения на Шестовичской и Петриковской площадях. В одной скважине глубиной 2229,0 м исследован разрез ланского надгоризонта в интервале от 1903,0 м до 1906,0 м, в другой скважине глубиной 2892,0 м изучению подлежали два интервала, из которых: 1-ый интервал (2240,0-2771,0 м) включал отложения задонского надгоризонта и полоцкого горизонта, совместно опробованные, а 2-ой интервал (2771,0-2840,0 м) – породы полоцкого горизонта.

Заключение

Проанализировав имеющуюся информацию, можно сделать следующие выводы.

В геологическом разрезе скважин рассматриваемого месторождения наиболее изученными являются мезо-кайнозойские отложения, причем с равномерным характером распределения по площади. Среди них к самым исследованным в гидрогеологическом отношении относятся четвертичные отложения, из-за их близкого расположения к поверхности земли, и палеогеновые отложения, получившие детальное изучение при выявлении источника централизованного водоснабжения г. Петрикова и окрестностей.

В разрезе палеозойских отложений наиболее изученными можно назвать верхнедевонские надсолевые карбонатно-терригенные отложения, предпочтение изучению которых отдавалось как потенциально обеспечивающих водозащиту при отработке полезного ископаемого. Здесь следует также отметить, что западная и восточная части участка имеют разную степень изученности: западная – освещена в большей степени, но, тем не менее, по мнению авторов, подлежит дальнейшему гидрогеологическому изучению в связи с выклиниванием калийных горизонтов и ограниченной отработкой калийной руды, восточная часть – в меньшей степени, но разрез представлен достаточной мощностью верхнесоленосных отложений, которые позволяют производить отработку без ограничений.

Список цитированных источников

1. Сводная легенда для гидрогеологических карт масштаба 1:200000 Белорусской серии листов / Министерство геологии СССР, Управление геологии БССР. – Минск, 1986. – 60 с.
2. Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ, Департамент по геологии. – Минск, 2010. – 305 с.
3. Геология Беларуси / НАН Беларуси, Институт геологических наук; под ред. А.С. Махнача [и др.]. – Минск: Институт геологических наук, 2001. – 815 с.
4. Отчет о результатах геологоразведочных работ на Петриковском месторождении калийных солей Петриковского района Гомельской области БССР с подсчетом запасов по промышленным категориям по состоянию на 1 октября 1974 г. (Петриковские объекты № 2 и 3). – БГРЭ, 1974.
5. Отчет о результатах гидрогеологического и инженерно-геологического доизучения масштаба 1:200 000 территории листов N-35-XXXIV (Житковичи) и N-35-XXXV (Петриков). – БГГЭ, 2003.
6. Гидрологические обследования уровня грунтовых вод Северного участка Петриковского месторождения: отчет о НИР / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2013. – Договор 58-12 (Петриковский ГОК).

7. Отчет о поисково-разведочных гидрогеологических работах с целью выявления и оценки эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Петрикова Гомельской области БССР. – БГРЭ, 1980.

8. Отчет о детальной разведке Бриневского бурогольного месторождения Петриковского района Гомельской области, проведенной в 1996-2001 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2002 г. – БГРЭ, 2002.

9. Разработка исходных данных для проекта проходки скипового и клетового шахтных стволов: отчет о НИР / ОАО «Белгорхимпром». – Минск, 2013. – Договор 58-12 (Петриковский ГОК).

10. Отчет о результатах предварительной разведки Петриковского месторождения калийных солей (Северный и Южный участки) Петриковского района Гомельской области БССР с подсчетом запасов калийных солей по категориям C_1 и C_2 по состоянию на 1 октября 1971 г. (Петриковский объект). – БГРЭ, 1971.

11. Отчет о результатах геологоразведочных работ по доразведке запасов калийных солей Петриковского месторождения Петриковского района Гомельской области, проведенных в 2012-2013 годах, с переоценкой (подсчетом) запасов по состоянию на 01.01.2013 г. (Петриковский объект № 4). – БГРЭ, 2013.

12. Отчет о результатах глубокого бурения на Шестовичской и Петриковской площадках, расположенных в Петриковском районе Гомельской области БССР и некоторые вопросы по стратиграфии и литологии Припятской впадины. – Минск, 1989.

13. Отчет о результатах разведки Конковичской площади (Гомельская область БССР). – «Союзбургаз», 1989.

Katsemba S.N., Zlebova A.E., Vorontsova I.V., Ivanov D.L.

State of knowledge of hydrogeology of Mesozoic, Cenozoic and Paleozoic deposits at Northern section of Petrikov deposit of potash salt

The article discusses in the stratigraphic sequence hydrogeological studies that have been carried out at Northern section of Petrikov potash deposit with the purpose of investigation of water-bearing (and low water yield) horizons (and complexes) of the zone of intensive water exchange and water-proof locally water-bearing (low water yield) horizons of the zone of slow (and very slow) water exchange, occurring in geological cross-section of the studied area.

Поступила в редакцию 28.04.2016 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.6-229.384:621.78(047)(476)

**СОВМЕЩЕННОЕ МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ
ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕЖЕСТКИХ ГИДРОЦИЛИНДРОВ
ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Довгалев А.М., Тарадейко И.А. (ГУВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

В статье представлены технологическая установка и инструменты с магнитным и электромагнитным приводом деформирующих шаров, позволяющие осуществлять совмещенную магнитно-динамическую упрочняющую обработку поверхности отверстия горно-шахтного оборудования.

Введение

В горном машиностроении значительный удельный вес занимает изготовление деталей гидравлических устройств, к числу которых относятся трубы гидравлических цилиндров (в том числе силовых), имеющие диаметральный размер от 35 до 820 мм и длину – от 165 до 6000 мм, вес – от нескольких килограмм до десятков тонн, а также гильзы и втулки, к внутренним поверхностям которых предъявляются высокие требования по качеству и эксплуатационным свойствам.

В технологических процессах изготовления указанных деталей важное место занимают операции отделочно-упрочняющей обработки, как правило, осуществляемые жесткими шариковыми (роликовыми) раскатниками или комбинированными инструментами, позволяющими совместить процессы размерной и отделочной обработки [1, 2].

Учитывая применение в традиционных технологических процессах изготовления труб цилиндров (далее цилиндров) жестких раскатников, конструктор гидравлических устройств вынужден преднамеренно завышать толщину их стенки и тем самым существенно увеличивать жесткость и металлоемкость конструкции.

Кроме того, упрочнение внутренней поверхности вращения жесткими раскатниками осуществляется на станках токарной группы с вращением заготовки, что увеличивает энергоемкость процесса механической обработки.

В связи с этим, актуальным является разработка новых способов динамического поверхностного пластического деформирования и инструментов для их реализации, не имеющих указанных выше недостатков, характеризующихся малыми силами деформирования и позволяющими обеспечить высокие качественные характеристики внутренних поверхностей вращения тонкостенных, а, следовательно, нежестких цилиндров гидравлических устройств горно-шахтного оборудования.

В соответствии с поставленной задачей разработан новый способ поверхностного пластического деформирования, при котором на поверхность отверстия ферромагнитной детали одновременно воздействуют вращающимся магнитным полем и деформирующими шарами, свободно установленными в кольцевой камере перемещаемого с подачей инструмента. При этом деформирующим шарам сообщают радиальные колебательные движения от вращающейся магнитной системы инструмента [3, 4].

Совмещенное магнитно-силовое воздействие на поверхность ферромагнитной детали позволяет сформировать наноструктурированный поверхностный слой, имеющий высокие качественные и эксплуатационные характеристики. При этом обеспечивается высокая интенсивность деформирования микронеровностей поверхности, снижение сил деформирования и уменьшение энергоемкости процесса упрочняющей обработки [5].

Для реализации предложенного способа отделочно-упрочняющей обработки перспективным является разработка технологического оснащения и инструментов с учетом габаритных размеров упрочняемых деталей и программы их выпуска.

Инструмент для совмещенного магнитно-динамического упрочнения (СМДУ) нежестких цилиндров малой длины

Для совмещенной упрочняющей обработки нежестких цилиндров небольшой длины актуальной является разработка инструментов с автономным приводом деформирующих шаров, не требующих вращения корпуса и обеспечивающих упрочнение поверхности отверстия за один рабочий ход.

На рисунке 1 изображена схема совмещенной магнитно-динамической обработки внутренней поверхности цилиндра инструментом, имеющим магнитный привод деформирующих шаров [6, 7].

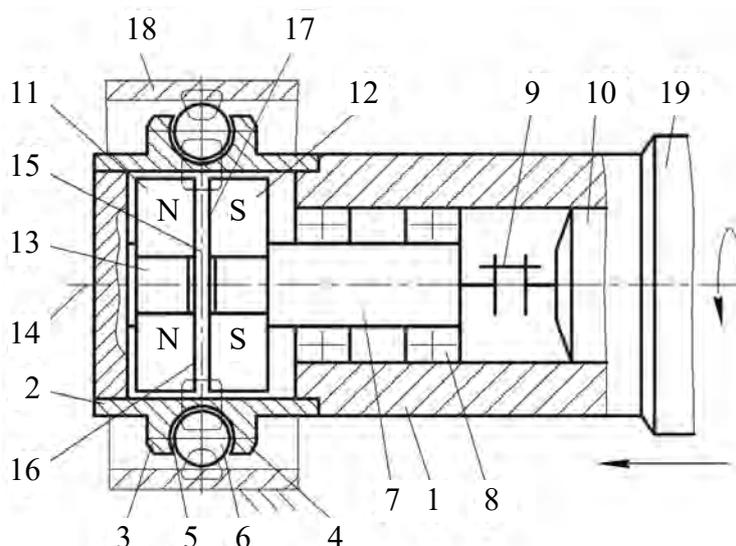


Рисунок 1. – Схема СМДУ поверхности отверстия цилиндра

Инструмент содержит: корпус 1; насадку 2 с фланцами 3, 4, торцевые поверхности которых образуют кольцевую камеру 5; деформирующие шары 6, установленные в кольцевой камере 5 с возможностью осуществления пространственных колебательных движений. Инструмент содержит также устройство разгона деформирующих шаров 6, выполненное в виде ротора 7, подшипников 8, муфты 9, электродвигателя 10 и двух идентичных постоянных магнитов 11, 12 радиальной намагниченности с последовательным чередованием полюсов N и S. При этом постоянный магнит 11 закреплен на неподвижной оправке 13, а магнит 12 – на роторе 7. Постоянные магниты 11, 12 расположены соосно оси 14 ротора 7, симметрично плоскости симметрии 15 кольцевой камеры 5. Смежные торцевые поверхности 16, 17 постоянных магнитов 11, 12 установле-

ны с зазором. Корпус 1, насадка 2, ротор 7, оправка 13 изготовлены из немагнитных материалов.

Упрочняемый цилиндр 18 закрепляют в технологическом приспособлении, а корпус 1 инструмента – в держателе 19. Инструмент вводят соосно в обрабатываемое отверстие и совмещают плоскость симметрии 15 кольцевой камеры 5 с торцом цилиндра 18. Ротору 7 посредством электродвигателя 10 сообщают вращение и перемещают инструмент с подачей вдоль упрочняемой поверхности.

Под действием вращающегося магнитного поля деформирующие шары 6 перемещаются по кольцевой камере 5 и осуществляют пространственные колебательные движения. Характеристики колебаний деформирующих шаров 6 существенно увеличиваются за счет периодического изменения относительного положения полюсов N и S подвижного 12 и неподвижного 11 магнитов инструмента. В свою очередь увеличивается частота и сила динамического воздействия деформирующих шаров 6 на упрочняемую поверхность цилиндра 18.

Одновременно деформирующие шары 6, являясь элементом магнитной системы инструмента, намагничивают и воздействуют переменным магнитным полем на поверхность ферромагнитного цилиндра 18. Таким образом, в процессе обработки имеет место совмещенное магнитно-динамическое упрочнение, позволяющее интенсифицировать процесс поверхностного пластического деформирования, получить на упрочняемом цилиндре наноструктурированный поверхностный слой с высокими качественными характеристиками. При этом динамические силы деформирования ниже (на порядок и более) сил деформирования, возникающих при упрочнении поверхностей жесткими раскатниками, используемыми в традиционных технологических процессах изготовления цилиндров. Это исключает деформацию тонкостенных нежестких цилиндров и повышает точность их геометрической формы в поперечном сечении.

В связи с отсутствием вращения упрочняемого цилиндра существенно снижается энергоемкость процесса упрочняющей обработки.

Технологическая установка и инструменты для совмещенной упрочняющей обработки цилиндров большой длины

Наибольшую сложность в машиностроении вызывает отделочно-упрочняющая обработка цилиндров (применяемых в горно-шахтном оборудовании и имеющих большую длину), требующая применения специального крупногабаритного металлообрабатывающего оборудования, а также жесткой связи инструмента с механизмом, обеспечивающим ему осевую подачу. При этом практически невозможна упрочняющая обработка нежестких цилиндров в связи со значительными по величине силами деформирования и большим крутящим моментом, действующим на деталь со стороны инструмента.

В связи с этим актуальной является разработка современных технологий отделочно-упрочняющей обработки поверхности отверстия нежестких цилиндров большой длины.

На рисунке 2 представлена схема СМДУ внутренней поверхности цилиндров, труб (других аналогичных по конфигурации деталей), имеющих сколь угодно большую длину, на основе применения специальной технологической установки и инструмента.

Технологическая установка включает следующие основные элементы: сварной корпус 1; регулируемые опоры 2, 3 с призматической рабочей поверхностью; блоки 4, 5; кронштейны 6, 7; натяжные ролики 8, 9; редуктор 10; электродвигатель 11; шкив 12; гибкий элемент 13 (трос, цепь, лента и т.д.); фиксаторы 14, 15; корпус 16 инструмента с кольцевой камерой 17 и деформирующими шарами 18; упрочняемый цилиндр 19.

Опоры 2, 3, кронштейны 6, 7, натяжные ролики 8, 9, фиксаторы 14, 15 жестко соединены с корпусом 1 и имеют возможность регулировочного перемещения. Гибкий элемент 13 крепится к торцам инструмента 16 и охватывает шкив 12.

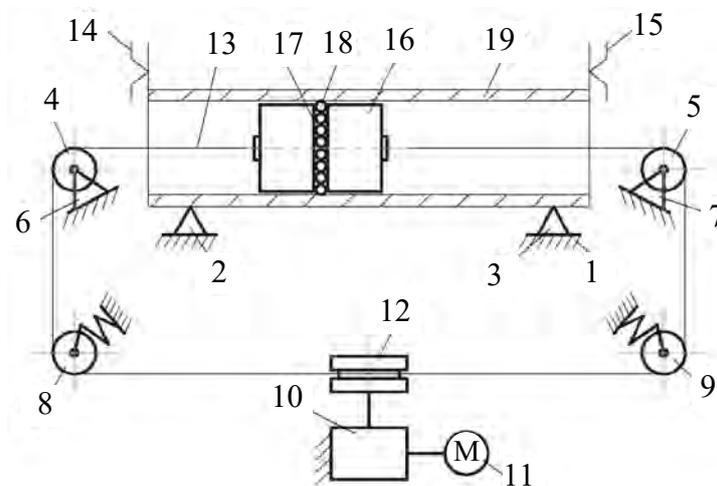


Рисунок 2. – Схема технологической установки для СМДУ внутренней поверхности цилиндров и труб большой длины

Упрочняемый цилиндр 19 устанавливают на опоры 2, 3 технологической системы. В полость отверстия вводят гибкий элемент 13, пропускают его через всю длину цилиндра 19 и соединяют его концы с торцами корпуса 16 инструмента. Размещают корпус 16 инструмента в отверстии цилиндра 19, совмещая плоскость вращения деформирующих шаров 18 с его торцом. Деформирующим шарам 18 сообщают вращение от магнитного привода. Включают электродвигатель 11, который посредством редуктора 10 вращает шкив 12 и тем самым перемещает гибкий элемент 13 с заданной скоростью. Соответственно, гибкий элемент 13 перемещает с рабочей подачей корпус 16 инструмента в осевом направлении цилиндра 19. Деформирующие шары 18 при этом (находясь в магнитном поле инструмента) воздействуют вращающимся магнитным полем на внутреннюю поверхность цилиндра 19 и осуществляют одновременно динамическое поверхностное пластическое деформирование. После окончания обработки концевой выключатель контактирует с торцом корпуса 16 инструмента и дает команду на остановку вращения деформирующих шаров 18. Инструмент возвращают в исходное состояние и отсоединяют гибкий элемент 13 от торцов корпуса 16. Упрочненный цилиндр 19 снимают, а на его место устанавливают очередной из обрабатываемой партии. Затем цикл обработки повторяется.

Описанная выше технология упрочняющей обработки цилиндров большой длины характеризуется высокой производительностью и обеспечивает повышение качественных характеристик упрочненной поверхности.

Важным направлением усовершенствования предложенной технологии отделочно-упрочняющей обработки является разработка прогрессивных инструментов для ее реализации.

На рисунке 3 изображен автономный инструмент с магнитным приводом деформирующих шаров, позволяющий осуществлять совмещенную магнитную и динамическую упрочняющие обработки.

Инструмент содержит: корпус 1 с осевым отверстием 2 и кольцевой камерой 3; ротор 4; подшипниковые опоры 5, 6; магнитную систему в виде диска 7 и радиально

установленных постоянных (пластинчатых или цилиндрических) магнитов 8; муфту 9; электродвигатель 10; деформирующие шары 11; окна 12; направляющие кольца 13, 14; захваты 15, 16. Корпус 1, ротор 4, диск 7, направляющие кольца 13, 14 выполнены из немагнитопроводных материалов.

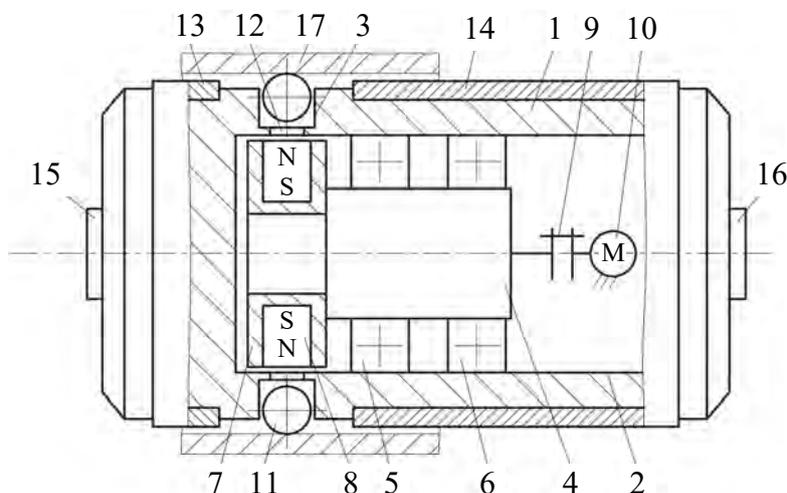


Рисунок 3. – Инструмент для СМДУ внутренней поверхности труб большой длины

Корпус 1 инструмента посредством захватов 15, 16 соединяют с гибким элементом технологической установки и вводят в полость отверстия упрочняемой трубы 17. Включают электродвигатель 10 и посредством гибкого элемента перемещают инструмент с осевой подачей. Вращающиеся постоянные магниты 8 через окна 12 периодически воздействуют магнитным полем на деформирующие шары 11 и сообщают им рабочие колебательные движения. Вибрирующие деформирующие шары 11, являясь частью магнитной системы инструмента, намагничиваются и воздействуют вращающимся магнитным полем на поверхность ферромагнитной трубы 17 и осуществляют высокоэффективное упрочнение поверхностного слоя [8].

Особенностью описанного инструмента является некоторое удаление источников магнитного поля 8 от деформирующих шаров 11 (вследствие наличия зазоров и перемычек 12 в корпусе 1), что снижает эффективность процесса поверхностного пластического деформирования и магнитного воздействия на поверхностный слой ферромагнитной детали.

Для устранения указанного недостатка разработан инструмент, обеспечивающий намагничивание деформирующих шаров от магнитов, расположенных непосредственно в зоне кольцевой камеры (рисунок 4) [9].

Основными элементами инструмента являются: ротор 1 с аксиально выполненными отверстиями 2, 3; кольцевая камера 4; деформирующие шары 5; источники магнитного поля в виде цилиндрических постоянных магнитов 6, 7; подшипниковые опоры 8, 9 и 10, 11; цилиндрические направляющие 12, 13; привод ротора 1 в виде муфты 14 и электродвигателя 15; крепежные элементы 16, 17. Цилиндрические постоянные магниты 6, 7 установлены с равномерным угловым шагом соответственно в аксиальных отверстиях 2, 3. Ротор 1 и цилиндрические направляющие 12, 13 изготовлены из немагнитопроводных материалов.

При работе инструмента деформирующие шары 5 удалены от постоянных магнитов 6, 7 на минимальное расстояние. Это позволяет непосредственно замыкать магнитный поток от источников магнитного поля 6, 7 на деформирующие шары 5, упроч-

няемую поверхность ферромагнитной детали 18 и осуществлять совмещенную упрочняющую обработку динамическим накатыванием и вращающимся магнитным полем.

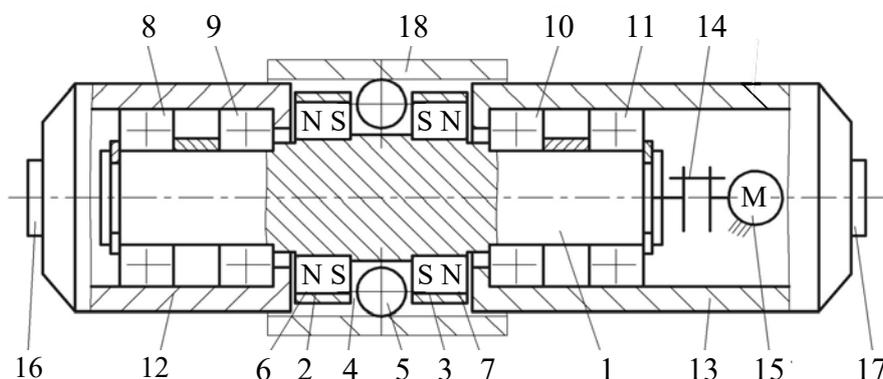


Рисунок 4. – Инструмент для совмещенной упрочняющей обработки ферромагнитных нежестких цилиндров вращающимся магнитным полем и динамическим накатыванием

Перспективным представляется двухрядный инструмент для СМДУ с приводом деформирующих шаров «бегущей волной» магнитного поля (рисунок 5) [10].

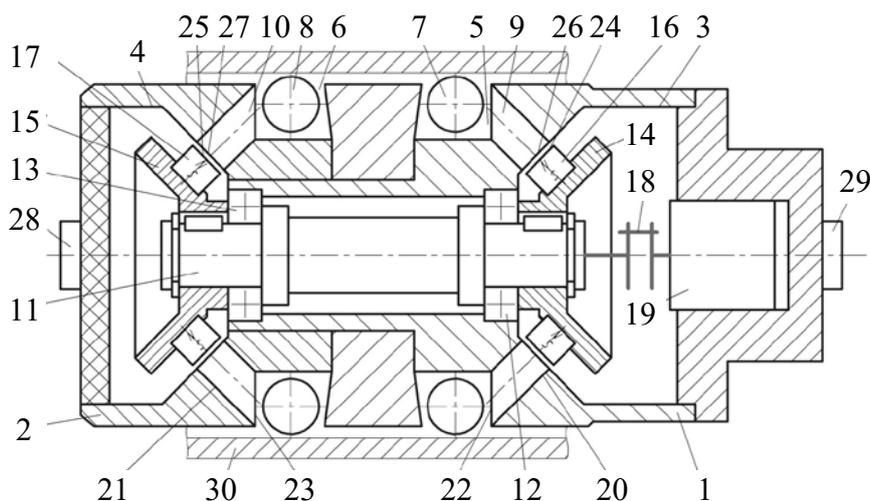


Рисунок 5. – Магнитно-динамический раскатник с приводом деформирующих шаров «бегущей волной» магнитного поля

Раскатник содержит: сборный корпус, состоящий из двух частей 1, 2; полости 3, 4; кольцевые камеры 5, 6; деформирующие шары 7, 8; магнитный привод деформирующих шаров, включающий цилиндрические магнитопроводы 9, 10; ступенчатый вал 11; подшипниковые опоры 12, 13; конические держатели 14, 15; цилиндрические постоянные магниты 16, 17; муфту 18; электро- или пневмодвигатель 19. Цилиндрические магнитопроводы 9, 10 запрессованы в равномерно расположенных в окружном направлении отверстиях 20, 21, соединяющих внутренние полости 3, 4 с кольцевыми камерами 5, 6. Поверхности цилиндрических магнитопроводов 9, 10 выполнены заподлицо с торцами 22, 23 кольцевых камер 5, 6 инструмента. Количество цилиндрических магнитопроводов 9, 10 выполнено четным, а расстояние между краями смежных магнитопроводов не превышает величину диаметра деформирующих шаров 7, 8. Ступенчатый вал 11 установлен в корпусе посредством подшипниковых опор 12, 13 и жестко соеди-

нен с коническими держателями 14, 15, на которых закреплены цилиндрические постоянные магниты 16, 17. Торцы 24, 25 цилиндрических постоянных магнитов 16, 17 установлены с зазором к торцам 26, 27 цилиндрических магнитопроводов 9, 10, выходящим во внутренние полости 3, 4 корпуса инструмента. Цилиндрические постоянные магниты 16, 17 равномерно расположены в окружном направлении, а их количество в два раза меньше количества цилиндрических магнитопроводов 9, 10. Ступенчатый вал 11 посредством муфты 18 соединен с электро- или пневмодвигателем 19. Части корпуса 1, 2, ступенчатый вал 11, конические держатели 14, 15 выполнены из немагнитопроводного материала, что исключает рассеивание магнитного поля.

Крепежные элементы 28 и 29 соединяют с гибким элементом технологической системы и вводят инструмент в отверстие неподвижного цилиндра 30. Посредством электро- или пневмодвигателя 19 ступенчатому валу 11 сообщают вращение. Вращение от вала 11 передается цилиндрическим постоянным магнитам 16, 17, закрепленным на конических держателях 14, 15. Вращаясь, цилиндрические постоянные магниты 16, 17 периодически совмещаются с цилиндрическими магнитопроводами 9, 10. Вследствие этого в кольцевых камерах 5, 6 возникает магнитное поле. Причем магнитное поле смещается в направлении вращения магнитов 16, 17 (т.е. образуется «бегущая волна» магнитного поля).

Вращающееся магнитное поле воздействует на упрочняемую поверхность цилиндра 30 и деформирующие шары 7, 8, разгоняя их в окружном направлении кольцевых камер 5, 6 инструмента. Деформирующие шары 7, 8 под действием центробежной и магнитной сил осуществляют совмещенное упрочнение поверхностного слоя цилиндра 30.

Характерной особенностью инструментов для СМДУ, представленных на рисунках 1, 3-5, является наличие магнитной системы на основе существующих разновидностей постоянных магнитов.

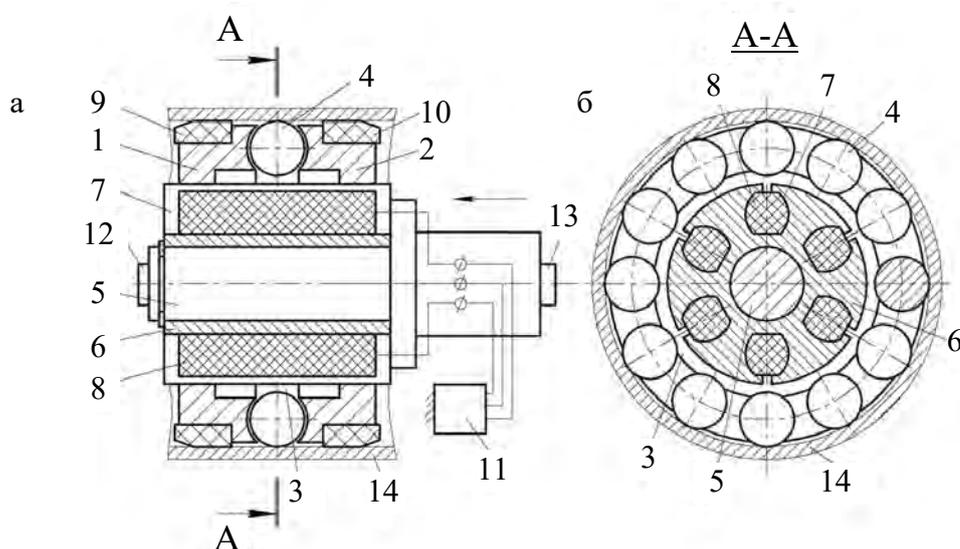
Инструменты для совмещенной упрочняющей обработки нежестких цилиндров с электромагнитным приводом деформирующих шаров

Новым направлением усовершенствования процесса СМДУ поверхности цилиндров является разработка конструкций инструментов, обеспечивающих сообщение деформирующим шарам колебательных движений вращающимся электромагнитным полем, создаваемым неподвижными трехфазными обмотками переменного тока [11].

Такой инструмент, изображенный на рисунке 6, содержит: диски 1, 2 из немагнитопроводного материала; кольцевую камеру 3; деформирующие шары 4; оправку 5; цилиндрический магнитопровод 6 с радиальными пазами 7; трехфазные обмотки переменного тока 8; направляющие кольца 9, 10; преобразователь частоты 11, крепежные элементы 12, 13 для соединения с гибкой тягой механизма подачи. Деформирующие шары 4 установлены в кольцевой камере 3 с возможностью окружного вращения и осуществления колебательных движений. Трехфазные обмотки переменного тока 8 размещены в радиальных пазах 7 цилиндрического магнитопровода 6.

Направляющие кольца 9, 10 вводят в контакт с поверхностью отверстия и совмещают продольные оси инструмента и упрочняемого цилиндра 14. На трехфазные обмотки переменного тока 8 с помощью преобразователя частоты 11 подают трехфазное напряжение переменного тока. Одновременно инструмент с помощью механизма подачи технологической установки перемещают вдоль обрабатываемой поверхности цилиндра. Вследствие возникающего электромагнитного возбуждения обмоток 8 образуется внешнее (относительно неподвижного цилиндрического магнитопровода 6)

вращающееся электромагнитное поле, действующее на поверхность цилиндра и деформирующие шары 4 инструмента. Вращаемым электромагнитным полем деформирующие шары 4 разгоняются вдоль кольцевой камеры 3 инструмента, прижимаются центробежной силой к поверхности отверстия цилиндра 14 и осуществляют процесс СМДУ.



а – общий вид инструмента; б – сечение А-А инструмента

Рисунок 6. – Инструмент для СМДУ с электромагнитным приводом деформирующих шаров

Регулирование частоты вращения деформирующих шаров 4 осуществляют изменением угловой скорости вращения электромагнитного поля, подавая на трехфазные обмотки 8 переменный ток соответствующей частоты и напряжения.

Особенностью описанного выше инструмента является необходимость применения технологической установки, обеспечивающей ему подачу вдоль упрочняемой поверхности.

Устройство для СМДУ, изображенное на рисунке 7, имеет автономный привод подачи инструмента.

В состав устройства входят: деформирующий инструмент; крышки 1, 2 из немагнитопроводного материала с торцовыми уплотнениями 3, 4 и каналами 5, 6 для подвода рабочего агента; механизм автоматического сматывания электрического шнура 7, включающий закрепленный на торце одной из крышек держатель 8 с установленным с возможностью вращения валом 9, соединенным с барабаном 10, и спиральную пружину возврата 11, один конец которой закреплен на держателе 8, а другой – на валу 9.

Деформирующий инструмент включает: центрирующий стержень 12 из немагнитопроводного материала; обойму 13, состоящую из шихтованных пластин из магнитопроводного материала с центральным отверстием 14 и радиальными пазами 15, количество которых кратно трем; трехфазные обмотки переменного тока 16; преобразователь частоты 17; шайбы 18, 19; кольцевые камеры 20, 21, 22; поршни 23, 24 из немагнитопроводного материала с резиновыми манжетами 25, 26; деформирующие шары 27, установленные в кольцевых камерах 20-22 с возможностью осуществления пространственных колебательных перемещений. При этом обойма 13 центральным отверстием 14 установлена на центрирующем стержне 12, трехфазные обмотки переменного тока 16 размещены в радиальных пазах 15, шайбы 18, 19 установлены на наружной поверхности 28 обоймы 13 соосно центрирующему стержню 12.

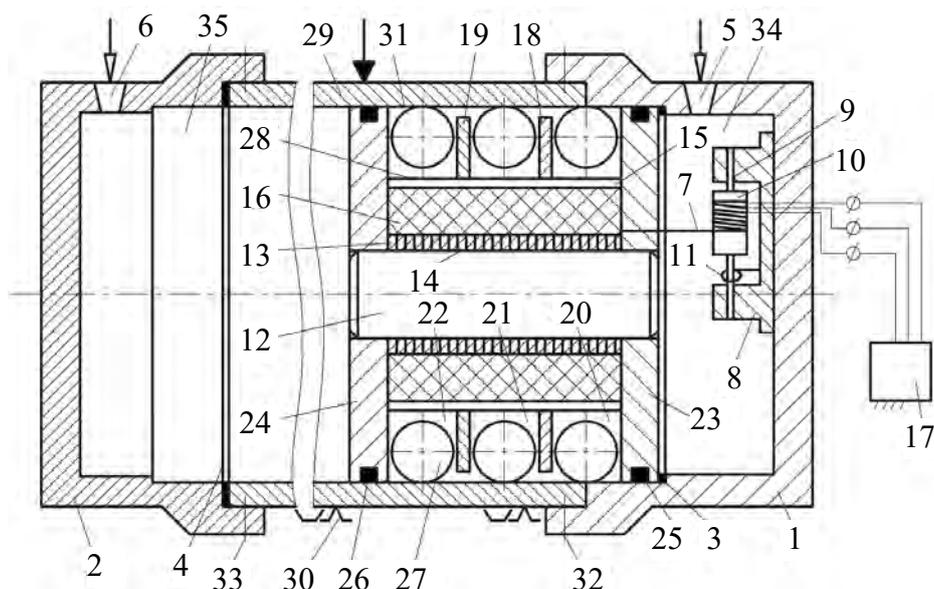


Рисунок 7. – Схема устройства для СМДУ внутренней поверхности цилиндра с автономным приводом подачи инструмента

Совмещенную упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Цилиндр 29 неподвижно устанавливают в направляющих 30 технологического приспособления. В отверстие 31 цилиндра 29 вводят многорядный деформирующий инструмент. Торцы цилиндра 29 посредством торцовых уплотнений 3, 4 герметично закрывают крышками 1, 2 и фиксируют их крепежными винтами 32, 33. Деформирующим шарам 27 сообщают окружное перемещение вращающимся электромагнитным полем от неподвижных трехфазных обмоток переменного тока 16 деформирующего инструмента. Для создания вращающегося электромагнитного поля на неподвижные обмотки 16 деформирующего инструмента с помощью преобразователя частоты 17 подают трехфазное напряжение переменного тока. Вследствие возникающего электромагнитного возбуждения обмоток 16 образуется вращающееся электромагнитное поле, выходящее в кольцевые камеры 20-22 инструмента. Вращающееся электромагнитное поле вызывает колебания деформирующих шаров 27 и воздействует на поверхностный слой цилиндра 29. Вследствие этого происходит совмещенная упрочняющая обработка внутренней поверхности цилиндра 29 динамическим накатыванием и магнитным полем с формированием модифицированного поверхностного слоя, обладающего комплексом высоких качественных и эксплуатационных свойств.

Для обеспечения процесса совмещенного упрочнения по всей длине обрабатываемого цилиндра 29 деформирующему инструменту сообщают возвратно-поступательное движение подачи. В каналы 5 и 6 крышек 1, 2 подают рабочий агент. Давление рабочего агента в полости 34 цилиндра 29 выше давления, создаваемого в полости 35. При этом соответственно сила давления рабочего агента, действующая на поршень 23, превышает силу, действующую на поршень 24. Вследствие этого деформирующий инструмент перемещается справа налево (рисунок 7), что и обеспечивает упрочнение поверхностного слоя отверстия 31 цилиндра 29 по всей длине обработки.

Скорость подачи деформирующего инструмента регулируют разницей давления рабочего агента в противоположных полостях 34 и 35 цилиндра 29. Чем больше разница давления рабочего агента в указанных полостях, тем выше скорость подачи дефор-

мирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Количество рабочих ходов инструмента выбирают в зависимости от требуемых характеристик поверхностного слоя упрочняемого цилиндра 29 [12].

Заключение

В статье приведены сведения о способе СМДУ поверхности отверстий цилиндров, позволяющем обеспечить комплексное магнитно-силовое воздействие и получить модифицированный поверхностный слой с высокими качественными и эксплуатационными характеристиками.

Представлена схема технологической установки для отделочно-упрочняющей обработки внутренней поверхности нежестких цилиндров и труб большой длины. Разработаны конструкции упрочняющих инструментов с автономным магнитным и электромагнитным приводом деформирующих шаров.

Список цитированных источников

1. **Чистосердов, П.С.** Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. – Минск: Беларусь, 1997. – 127 с.
2. **Чистосердов, П.С.** Совмещенная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием / П.С. Чистосердов, В.В. Радьков. – М.: УТПМ, 1992. – 83 с.
3. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2068770 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4922542/27; заявл. 29.03.91; опубл. 10.11.96 // Бюллетень. – 1996. – № 31.
4. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления: пат. 2089373 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97 // Бюллетень. – 1997. – № 25.
5. **Довгалеv, А.М.** Комбинированное магнитно-вибродинамическое накатывание поверхности отверстий нежестких деталей машин / А.М. Довгалеv // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 4. – С. 14-21.
6. Инструмент для упрочняющей обработки: пат. 2047468 РФ, МКИ 6В24В39/00 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4906000/08; заявл. 30.01.91; опубл. 10.11.95 // Бюллетень. – 1995. – № 31.
7. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 10188 РБ, МПК В24В39/00 / А.М. Довгалеv, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а 20050605; заявл. 16.06.2005; опубл. 28.02.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 1. – С. 78.
8. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки: пат. 2068764 РФ, МКИ 6В24В39/02 / А.М. Довгалеv; заявитель А.М. Довгалеv. – № 4698344/08; заявл. 31.05.89; опубл. 10.11.96 // Бюллетень. – 1997. – № 31.
9. Способ и инструмент для магнитно-центробежного раскатывания внутренней поверхности круглого отверстия в металлической детали: пат. 18153 РБ, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалеv, Д.М. Рыжанков; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а 20111513; заявл. 15.11.2011; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 67.

10. **Довгалеv, А.М.** Магнитно-динамическое упрочнение внутренней поверхности пневматических и гидравлических цилиндров большой длины / А.М. Довгалеv // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 4. – С. 39-43.

11. Способ поверхностного пластического деформирования отверстия цилиндрической детали и инструмент для его осуществления: пат. 18300 РБ, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалеv, С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а 20120033; заявл. 11.01.2012; опубл. 30.06.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 3. – С. 76-77.

12. Устройство для поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра и способ поверхностного пластического деформирования внутренней поверхности цилиндра: пат. 18191 РБ, МПК В24В39/02 / А.М. Довгалеv, С.А. Сухоцкий, Д.М. Рыжанков, Д.М. Свирепа; заявитель ГУВПО «Белорусско-Российский университет». – № а 20111736; заявл. 15.12.2011; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 67-68.

Dovgalev A.M., Taradeiko I.A.

Combined magnetic dynamic hardening of internal surface of the non-rigid hydraulic cylinders of mining equipment

The article presents a processing plant and tools with magnetic and electromagnetic drive of deforming balls that allow carrying out a combined magnetic dynamic hardenable processing of aperture surface of mining equipment.

Поступила в редакцию 20.07.2016 г.

УДК 621.891(075.8)

ИЗНАШИВАНИЕ РОЛИКОВ ВАЛКОВОГО ПРЕССА С РЕЛЬЕФНОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Ищенко М.В. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь), Кондратчик Н.Ю. (УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь)

Приводятся результаты исследований изнашивания бандажей роликов вальц-пресса, условия эксплуатации которых моделировались на дисковой машине трения. Анализируются закономерности влияния нагрузки и скорости относительного перемещения на изнашивание стальных роликов, разделенных уплотняемой дисперсной массой хлористого калия. Показано, что ролики с рифленой рабочей поверхностью при трении качения подвергаются более интенсивному изнашиванию, чем с гладкой. При этом, кроме усталостного, окислительного и абразивного видов реализуется эрозионное изнашивание кромок углублений, которое вносит существенный вклад в разрушение поверхностей трения бандажей.

Введение

Одной из важных трудно решаемых проблем горного машиностроения является обеспечение надежности узлов технологического оборудования, осуществляющего гранулирование калийных удобрений [1]. Особое место в решении этой проблемы принадлежит повышению долговечности быстроизнашивающихся бандажей роликов вальц-пресса. К настоящему времени выявлены закономерности влияния режимов нагружения и состава уплотняемой сыпучей массы на изнашивание бандажей, определены основные механизмы разрушения рабочих поверхностей [2-4]. Однако эти закономерности характерны для трения качения деталей с гладкими рабочими поверхностями.

Для реализации технологического процесса гранулирования поверхностный слой бандажей роликов вальц-пресса должен содержать углубления, необходимые для захвата и подачи сыпучей массы в зону сдавливания между валками и выталкивания изделия после прессования. Это должно приводить к существенному изменению напряженно-деформированного состояния валков, перераспределению контактного давления и, как следствие, к изменению механизмов и интенсивности изнашивания металла [5, 6]. Поэтому представляло интерес изучить особенности трения и изнашивания бандажей, поверхностный слой которых содержит периодически повторяющиеся углубления, моделирующие рельеф рабочей поверхности натуральных валков вальц-пресса.

Методика испытаний

Испытания проводились на дисковой машине трения МД-1 по схеме контакта «боковая поверхность ролика – плоская поверхность вращающегося диска» (рисунок 1). Такая схема контакта реализует трение качения с проскальзыванием, возникающим вследствие того, что ролик конечной высоты движется по окружности. Ролик 1 изготавливался из высококачественной легированной стали марки 38ХНЗМФА в виде цилиндра высотой 12 мм и наружным диаметром 40 мм. Испытаниям подвергались две партии роликов. Цилиндрическая рабочая поверхность роликов первой партии выполнялась гладкой. В соответствии с рельефом рабочей поверхности натуральных дета-

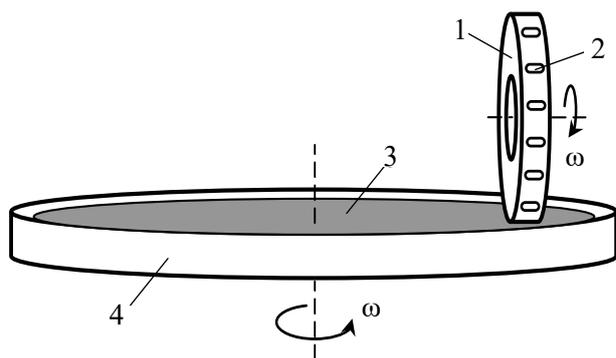


Рисунок 1. – Схема контакта образцов на машине трения МД-1

лей валц-пресса цилиндрическая поверхность трения ролика 1 второй партии содержала углубления 2 эллиптической формы (малая ось – 5 мм, большая – 8 мм, глубина 4 мм). Углубления располагались на расстоянии 10,7 мм друг от друга. Номинальная площадь поверхности трения ролика равнялась $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а шероховатость гладких участков поверхности соответствовала среднему арифметическому отклонению профиля $R_a = 0,06 \text{ мкм}$.

Под действием нормальной нагрузки ролик уплотнял слой дисперсной рабочей среды 3, расположенный на диске 4. В качестве рабочей среды использовался мелкодисперсный порошок хлористого калия (KCl). Нагрузка на ролик задавалась сменными грузами через рычаг, а скорость относительного перемещения v сопрягаемых деталей – изменением расстояния ролика от оси вращения диска.

Износ образцов регистрировали методом взвешивания, а линейную интенсивность изнашивания I_h определяли по формуле

$$I_h = \Delta m / (\rho A_a L),$$

где Δm – изменение массы ролика в результате изнашивания;

ρ – плотность изнашиваемого материала;

A_a – номинальная площадь поверхности трения ролика;

L – путь трения.

Результаты исследований

Испытания показали, что повышение нормальной нагрузки N на ролики сопровождается монотонным ростом их линейной интенсивности изнашивания (рисунок 1). При этом зависимости $I_h(N)$, характерные для роликов с углублениями, по форме кривых подобны таковым для роликов с гладкими рабочими поверхностями и обусловлены теми же причинами [2, 3]. Так, с повышением N увеличиваются контактные деформации металла и глубина внедрения абразивных частиц, а также глубина внедрения выступов поверхностей сопрягаемых деталей, возрастает температура в зоне контакта, что в совокупности приводит к интенсификации усталостного, абразивного и окислительного изнашивания, и в целом – к росту I_h .

Установлено, что по износостойкости ролики, содержащие углубления, значительно уступают роликам с гладкой поверхностью (рисунок 2). Так, при $v = 0,3 \text{ м/с}$ линейная интенсивность изнашивания роликов с углублениями эллиптической формы (кривая 3) в $\sim 1,7$ - $2,5$ раза выше, чем роликов с гладкой поверхностью трения (кривая 4). Одна из причин может заключаться в том, что в момент контакта с диском прилегающие к углублениям краевые полосы поверхности трения ролика воспринимают всю нагрузку, в том числе часть той, которая должна приходиться на область углубления. Это приводит к росту контактных деформаций, пластическому отеснению металла кромок и увеличению скорости протекания усталостных процессов в поверхностном слое. Однако анализ изношенных поверхностей трения рельефных роликов показал, что

этот фактор вносит определенный вклад, но не является доминирующим – в указанных областях следов усталостного изнашивания катастрофического характера обнаружено не было. На окислительное и абразивное изнашивание наличие углублений на поверхности трения также не могло оказать существенного влияния. Следовательно, более высокая I_h роликов с рельефной поверхностью обусловлена протеканием другого, не названного выше вида изнашивания.

При малых нагрузках (до ~30 Н) увеличение скорости v относительного перемещения приводит к слабозаметному снижению I_h , которое вызвано уменьшением контактных деформаций трущихся материалов и образованием более толстого слоя хлористого калия, разделяющего сопрягаемые детали (кривые 1-3 на рисунке 2). Измерения показали, что приращение температуры на фрикционном контакте при таких условиях нагружения незначительно и не должно оказывать влияния на процесс изнашивания.

В области $N > 35$ Н повышение скорости вызывает интенсивное увеличение I_h , причем, зависимость $I_h(v)$ значительно усиливается. На наш взгляд, причина такой зависимости не только в повышении температуры T в зоне трения (она достигала 200 °С), при котором интенсифицируется химическое взаимодействие окружающей среды и уплотняемой массы с металлом и увеличиваются контактные деформации материалов сопрягаемых деталей. Это действительно приводит к ускорению коррозионно-механического и усталостного изнашивания валков, однако не является единственной причиной роста интенсивности их изнашивания при увеличении скорости. Косвенно этот вывод подтверждается тем, что зависимость $I_h(v)$ для роликов с гладкими поверхностями менее ярко выражена, чем для роликов, содержащих углубления (кривые 3 и 4 на рисунке 2).

В связи с изложенным было сделано предположение, что в области повышенных скоростей относительного перемещения роликов с рельефными рабочими поверхностями существенный вклад в I_h

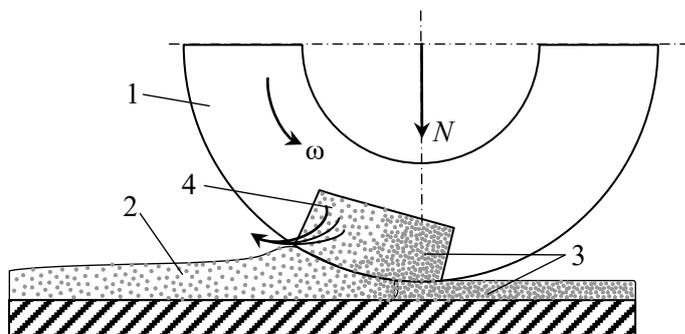
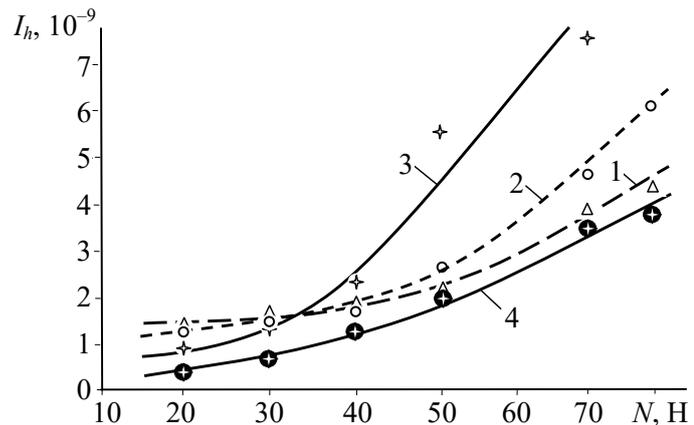


Рисунок 3. – Схема реализации эрозивного изнашивания бандажей вальц-пресса



1 – $v = 0,12$ м/с; 2 – $v = 0,2$ м/с; 3, 4 – $v = 0,3$ м/с
Рисунок 2. – Влияние нормальной нагрузки на интенсивность изнашивания роликов с рифленной (1-3) и гладкой (4) поверхностями трения

должно вносить эрозивное изнашивание кромок углублений. Схема реализации этого вида изнашивания представлена на рисунке 3.

При повороте валка (ролик 1) под действием нормальной нагрузки N происходит уплотнение насыпной массы 2 до состояния твердого тела 3. Масса хлористого калия уплотняется

также и в углублении ролика. При этом газовая фаза (преимущественно воздух), находящаяся в уплотняемой насыпной массе, последовательно выдавливается из правой области углубления в левую область и скапливается там. Если валок вращается с большой скоростью, то из области углубления с уплотненной массой газ не успевает медленно удалиться. Поэтому под быстро нарастающим давлением газ формируется в высокоскоростные микроструйки (на рисунке 3 показаны стрелками). Их течение перпендикулярно острой кромке углубления сопровождается эрозионным разрушением металла – молекулы газа образуют связи с атомами поверхности металла и передают им кинетическую энергию. После многократных такого рода взаимодействий одна из молекул газа «вытягивает» атом металла из кристаллической решетки [5]. Чем больше скорость движения молекул газа, тем больше энергия, передаваемая атому металла молекулами газа за одно взаимодействие, и тем выше вероятность его удаления.

Этот эффект усиливается благодаря тому, что воздушно-солевая среда является химически активной и образует на пластически деформируемых участках поверхности ролика слабо связанные с основным металлом соединения, которые легко разрушаются потоком выдавливаемого газа. В результате такого уноса металла из области, прилегающей к углублению, на его кромке (испытывающей наибольшие пластические деформации) образуются канавки, вытянутые в направлении вектора скорости.

Подтверждением того, что бандажи валков с рельефными рабочими поверхностями подвергаются эрозионному изнашиванию потоком химически активной газовой среды, являются снимки поверхностей трения изношенных кромок эллиптических углублений ролика (рисунок 4).

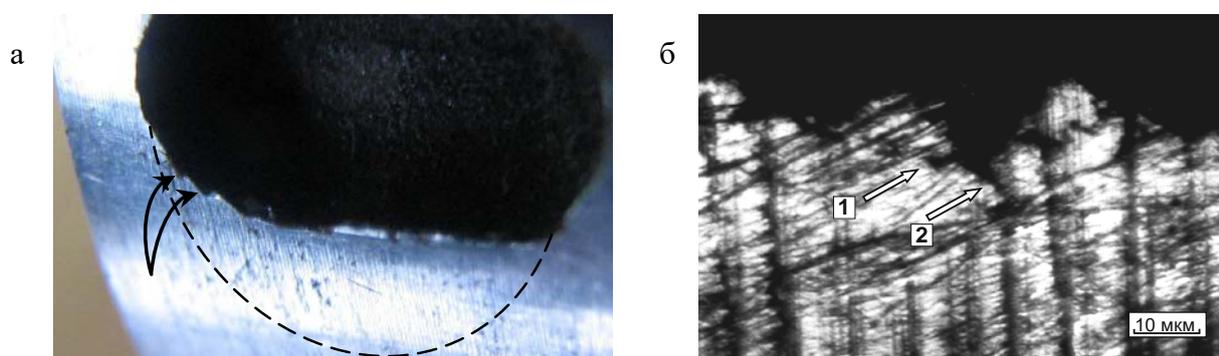


Рисунок 4. – Эрозионное изнашивание кромки углубления на поверхности изношенного ролика

После 180 часов испытаний на боковой поверхности углубления (стенка, перпендикулярная поверхности трения) образуются ветвящиеся канавки, выходящие на поверхность трения ролика (показаны стрелками на рисунке 4а). Ветвление канавок обусловлено, по-видимому, тем, что эрозионное разрушение протекает в основном на ослабленных участках структуры металла. На рисунке 4б видно, что кромка углубления изнашивается крайне неравномерно – боковые поверхности (стрелка 1) и дно (стрелка 2) эрозионной канавки могут содержать канавки меньших размеров. После более длительных испытаний эрозионное изнашивание распространяется на прилегающую к углублению область поверхности трения. На рисунке 4а эта область ограничена штриховой линией. При этом размеры разрушенной области значительно увеличиваются в направлении относительного перемещения сопрягаемых деталей.

Заключение

Интенсивность изнашивания валков из хромоникелевой стали с рельефной рабочей поверхностью в 1,7-2,5 раза выше, чем валков с гладкой поверхностью. При малых скоростях относительного перемещения валки подвергаются усталостному, коррозионно-механическому и абразивному изнашиванию, интенсивность протекания которых растет с повышением контактной нагрузки. Отмечено также пластическое отеснение материала на края углублений. С повышением скорости кромки углублений и прилегающие к ним области разрушаются более интенсивно, причем доминирующим видом становится эрозионное изнашивание.

Список цитированных источников

1. **Данилов, В.А.** Технология производства и ремонта горных машин и оборудования: в 2 т. / В.А. Данилов, В.Я. Прушак, Е.М. Найденышев. – Минск: Тэхналогія, 2007. – Т. 2: Ремонт и испытания горных машин и оборудования / под общ. ред. В.Я. Щербы. – 2007. – 491 с.
2. **Ищенко, М.В.** Закономерности изнашивания роликов валкового пресса в присутствии хлористого калия / М.В. Ищенко, Н.Ю. Кондратчик // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 1. – С. 44-48.
3. **Ищенко, М.В.** Изнашивание роликов валкового пресса в дисперсной массе хлористого калия / М.В. Ищенко, Н.Ю. Кондратчик // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 60-65.
4. **Севостьянов, И.В.** Теоретические и экспериментальные исследования пресс-валкового агрегата с предварительным уплотнением шихты: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13; 05.17.11 / И.В. Севостьянов. – Белгород, 2000. – 212 л.
5. **Богданович, П.Н.** Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
6. **Баюл, К.В.** Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.08 / К.В. Баюл. – Днепропетровск, 2008. – 173 л.

Ishchenko M.V., Kondratchik N.Yu.

Wear of rollers of a roller press with relief working surface

Results of researches of wear of the rim of roller press rollers, the operating conditions which are simulated on a disk friction machine are given. Patterns of influence of load and speed relative movement on wear of steel rollers separated by dispersed mass of potassium chloride are analyzed. It has been demonstrated that rollers with relief working surface wear off more intensively than rollers with smooth riding surface. In addition to fatigue, oxidative and abrasive types is implemented erosive wear on the edges of the recess, which makes a significant contribution to the destruction of the friction surfaces of the rim.

Поступила в редакцию 19.04.2016 г.

УДК 622.363.2:622.788.32(047)(476)

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАЛИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Прушак В.Я. (ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь), Данилов В.А. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь), Кондратчик Н.Ю. (УО «Барановичский государственный университет», г. Барановичи, Беларусь)

Рассмотрены основные направления совершенствования процесса и оборудования для компактирования мелкозернистого хлористого калия при производстве калийных удобрений путем его прокатки на вальц-прессах. Проанализированы пути повышения производительности вальц-прессов и плотности конечного продукта за счет рациональных схем прессования и конструктивных параметров его рабочих органов.

Введение

Интенсивное развитие калийной промышленности в Беларуси определяет актуальность повышения технического уровня технологического оборудования, применяемого на заключительной стадии производства удобрений. Мелкозернистый концентрат хлористого калия, полученный флотационным и галургическим методами, не соответствует требованиям к гранулометрическому составу калийных удобрений, поэтому технология их производства включает процесс компактирования – перевода материала из порошкообразного в спрессованное состояние определенной формы (рифленую ленту). Полученный на этой стадии производства материал далее подвергается дроблению и классификации с целью отделения кондиционной фракции от остального продукта, подлежащего последующей переработке в гранулы нужного размера.

Эффективность технологии производства калийного удобрения во многом зависит от совершенства применяемого прессового оборудования. Из множества известных в промышленности методов прессования порошкообразных материалов (изостатическое уплотнение в эластичной оболочке, прессование в закрытой пресс-форме, вибрационное, импульсное, мундштучное прессование и т.п.) в калийном производстве применяется прокатка мелкозернистого хлористого калия на вальцевых (валковых) прессах, обеспечивающих непрерывность и высокую производительность процесса (до 70 т/ч и более) при относительно меньших затратах энергии и эксплуатационных расходах по сравнению с другими видами прессования.

Высокая стоимость зарубежного оборудования данного типа обуславливает актуальность производства отечественных высокопроизводительных вальцевых прессов. В Беларуси их проектирует и выпускает ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». На рисунке 1 представлены общий вид вальц-пресса и одно из исполнений его валка с формующими элементами на рабочих поверхностях, изготовленных этим предприятием.

Практический опыт эксплуатации валковых прессов при производстве хлористого калия показывает, что они не всегда обеспечивают равномерное распределение прессуемого материала по ширине валков и полное исключение из него газов, не позволяют в должной степени управлять предварительным уплотнением исходного материала и, следовательно, давлением прессования, что отрицательно влияет на качество спрессованного материала.

а



б



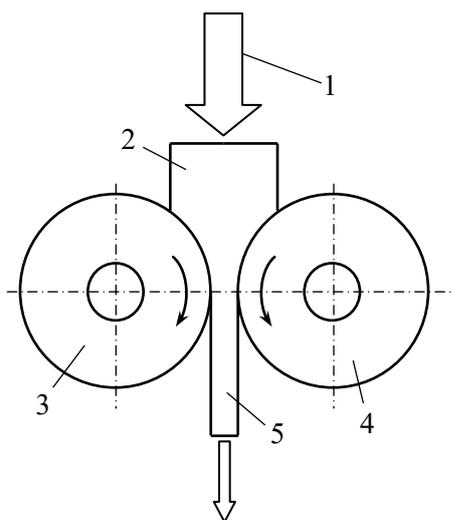
Рисунок 1. – Общий вид вальц-пресса (а) и валка с формующими элементами на рабочих поверхностях (б)

Отмеченные обстоятельства определяют актуальность исследований и практических разработок в этой области, направленных на повышение производительности и качества прессования, надежности функционирования вальц-прессов. В статье рассмотрены некоторые пути решения этих задач.

Совершенствование схемы прессования

Схема прессования хлористого калия, реализуемая на вальцевом прессе, показана на рисунке 2. Исходный материал 1 в порошкообразном состоянии подается через бункер 2 к вращающимся навстречу друг другу валкам 3 и 4 вальц-пресса и уплотняется ими под действием создаваемого в зоне прессования давления.

Рабочая поверхность валков в зависимости от требуемой формы спрессованного материала может быть гладкой или иметь формующие элементы (рисунок 1б) определенной формы и размеров [1, 2], влияющих на условия прессования, развиваемое



1 – прессуемый материал;
2 – бункер; 3, 4 – валки; 5 – плитка
Рисунок 2. – Схема прессования

удельное давление, износостойкость рабочей поверхности вала, а также на выбор метода и трудоемкость обработки [3].

В результате взаимодействия с валками порошкообразный исходный продукт трансформируется в твердое тело с определенной плотностью (гладкую или рифленую ленту, брикеты и т.п.), в соответствии с конфигурацией формирующих элементов рабочих поверхностей валков.

Валки установлены на станине пресса в подшипниковых опорах, при этом опоры одного вала прикреплены к ней жестко, а опоры другого вала установлены с возможностью перемещения относительно станины под действием гидроцилиндров или пружин, что позволяет стабилизировать усилие прессования и предотвратить отказ пресса при попадании между валками высокопрочных объектов. Зазор между

валками настраивается, исходя из требуемой толщины и плотности спрессованного материала.

В современных вальц-прессах каждый валок оснащен индивидуальным приводом, в качестве которого применяются регулируемые двигатели постоянного тока или переменного тока, а также гидромоторы. Валки с общим приводом соединяются между собой зубчатой передачей, обеспечивающей синхронное их вращение и неизменное относительное расположение. Такая стабилизирующая зубчатая передача используется иногда и при оснащении валков индивидуальными приводами.

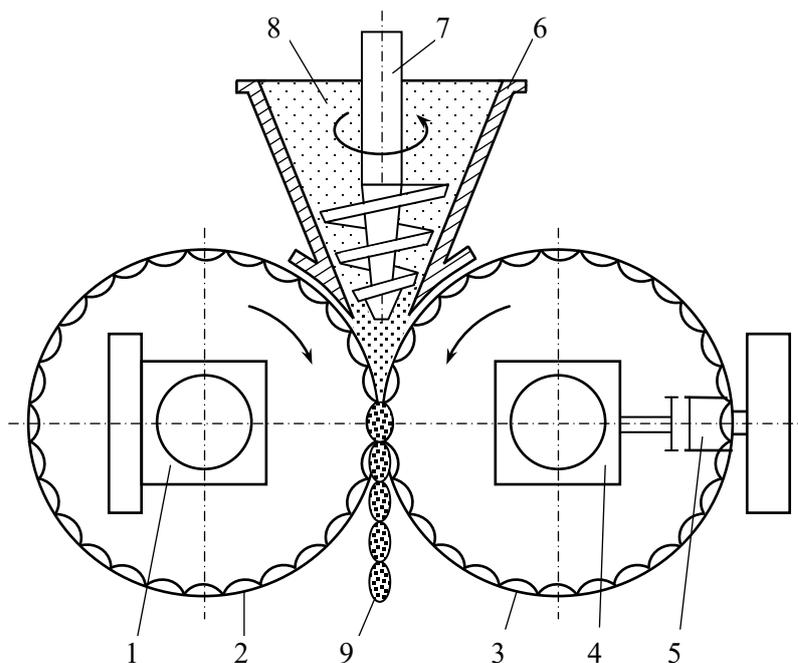
Обеспечение высокой плотности спрессованного материала является важной технико-экономической задачей, т.к. с увеличением плотности конечного продукта повышается производительность вальц-пресса. Ее решение представляет определенные технические трудности, что обусловлено вытеснением воздуха из прессуемого материала навстречу подаваемому материалу, из-за чего он может находиться в псевдооживленном состоянии. Это препятствует равномерному поступлению исходного материала в зону деформации, уменьшает его плотность, которая вблизи рабочих поверхностей валков в результате насыщения исходного материала воздухом становится меньше его насыщенной плотности, что отрицательно влияет на плотность конечного продукта.

Повысить плотность последнего можно за счет увеличения диаметра валков, уменьшения частоты их вращения, а также применения специального устройства (подпрессовщика) для уплотнения материала перед поступлением его в зону прессования. В валковых прессах применяются подпрессовщики различного конструктивного исполнения: барабанные, роторные, шнековые, вибрационные и др. Подпрессовщик должен повышать плотность материала, подаваемого в зону прессования, обеспечивать удаление из него скоплений воздуха, равномерную подачу и распределение материала по ширине валков, что важно для достижения высокой плотности конечного продукта и, следовательно, производительности вальц-пресса.

Вальц-прессы для сыпучих материалов оснащаются обычно шнековыми подпрессовщиками с цилиндрическими или коническими шнеками, приводимыми во вращение индивидуальными приводами. Согласно рисунку 3, вальц-пресс оснащен подпрессовщиком с коническим шнеком 7, расположенным вертикально над валками 2 и 3,

первый из которых снабжен неподвижной опорой 1, а второй – опорой 4, имеющей возможность горизонтального перемещения посредством гидроцилиндра 5.

Над валками 2 и 3 расположен бункер 6, в который подается исходный материал 8. Под действием силы тяжести и шнека 7 он поступает на вращающиеся валки 2, 3 и при прохождении между ними подвергается уплотнению (прессованию), которое сопровождается деформацией частиц материала и вытеснением из него воздуха. В результате формируется конечный продукт 9.

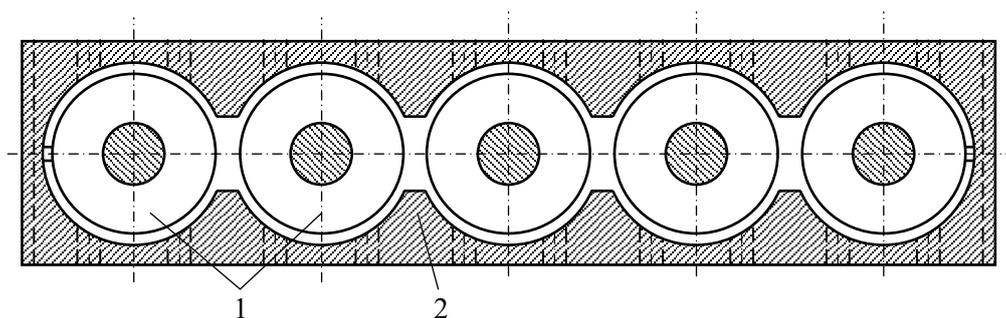


1 – неподвижная опора; 2, 3 – валки; 4 – плавающая опора; 5 – гидроцилиндр;
6 – бункер; 7 – шнек подпрессовщика; 8 – исходный материал; 9 – конечный продукт
Рисунок 3. – Конструктивная схема вальц-пресса со шнековым подпрессовщиком

Коническая форма бункера 6 и шнека 7 способствуют увеличению давления, создаваемого подпрессовщиком, что позволяет поместить в каждый формирующий элемент валка больше исходного материала, чем при его подаче только под действием силы тяжести. Благодаря этому увеличивается производительность вальц-пресса и создаются условия для прессования с более высоким давлением, а также повышается плотность конечного продукта. Этому способствует и то, что под действием подпрессовщика происходит перемешивание прессуемого материала и более интенсивное удаление из него воздуха. В этой связи одним из направлений совершенствования вальц-прессов является обоснованный выбор схемы прессования и конструкции подпрессовщика.

Характерным недостатком схемы питания вальц-пресса исходным материалом при вертикальном расположении шнеков является неравномерность его распределения по ширине валков, что является одной из причин различной плотности конечного продукта. Совершенствование конструкции вальц-прессов по этому признаку возможно за счет оптимизации количества и расположения шнеков относительно друг друга и валков, с тем чтобы минимизировать их негативное взаимное влияние и обеспечить равномерную подачу исходного материала в зону прессования по всей ширине валков. С этой целью, например, согласно [4], шнеки 1 (рисунок 4) устанавливают в отдельном корпусе 2 шнекового питателя, конструкция которого обеспечивает разделение шнеков и соз-

даваемых ими потоков прессуемого материала, повышая тем самым равномерность его поступления по ширине валков вальц-пресса.

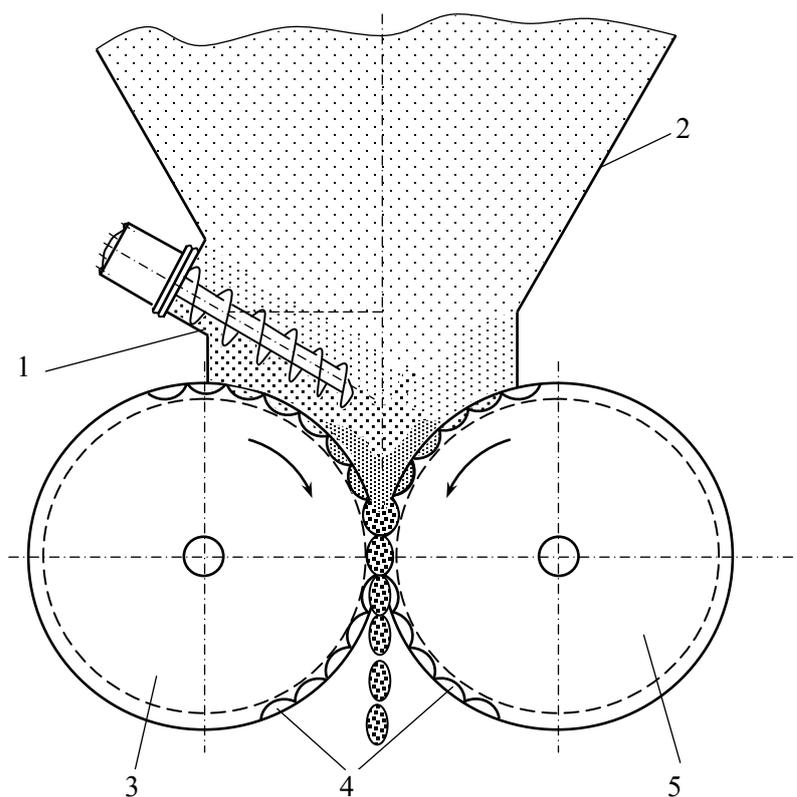


1 – шнек; 2 – корпус шнекового питателя

Рисунок 4. – Схема расположения шнеков в корпусе шнекового питателя вальц-пресса

Аналогично, взаимное влияние шнеков может быть ограничено с помощью разделителей в виде перегородок между ними.

Заслуживает внимания схема питания вальцевого пресса при расположении шнека 1 (рисунок 5) в нижней части бункера 2 под углом к вертикальной плоскости в непосредственной близости к рабочей поверхности валка 3 [5].



1 – шнек; 2 – бункер; 3, 5 – валки; 4 – формирующие элементы

Рисунок 5. – Конструктивная схема вальц-пресса с наклонно расположенным шнековым подпрессовщиком

Такое решение обеспечивает возможность подачи исходного материала в зону захвата с некоторым избытком и уплотнением, и, следовательно, более полное и рав-

номерное заполнение им формующих элементов 4 валков 3 и 5, а также получение конечного продукта с повышенной плотностью.

Практическое значение имеет оптимизация конструктивных параметров шнека и частоты его вращения с целью достижения требуемого эффекта по предварительному уплотнению прессуемого материала. Этот эффект может быть усилен, например, в существующих конструкциях вальц-прессов при их модернизации путем применения шнеков переменного шага (рисунок 6). Такой шнек по сравнению с коническим (рисунок 3), также создающим подпрессовку исходного материала, обеспечивает его подачу на большую площадь и более равномерное распределение по ширине вала. Переменный шаг лопасти шнека кроме транспортной функции обеспечивает более высокую степень уплотнения исходного материала по сравнению со шнеком постоянного шага, благодаря более плавному сжатию материала, тем самым улучшаются условия отвода воздуха из него, а значит – снижается степень разрыхления прессуемой массы. В результате на выходе из пресса валкового получают готовый продукт прессованного материала одинаковой плотности заданных параметров.

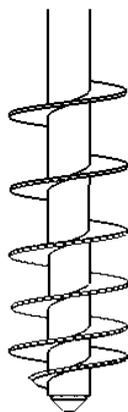


Рисунок 6. – шнек переменного шага

Практическое значение имеет определение частоты вращения шнека с учетом ее влияния на давление подпрессовки и долговечность шнека, подверженного абразивному и другим видам изнашивания при взаимодействии с хлористым калием, что требует проведения экспериментальных исследований по обоснованию выбора материалов и методов повышения их износостойкости с учетом абразивных и агрессивных свойств хлористого калия.

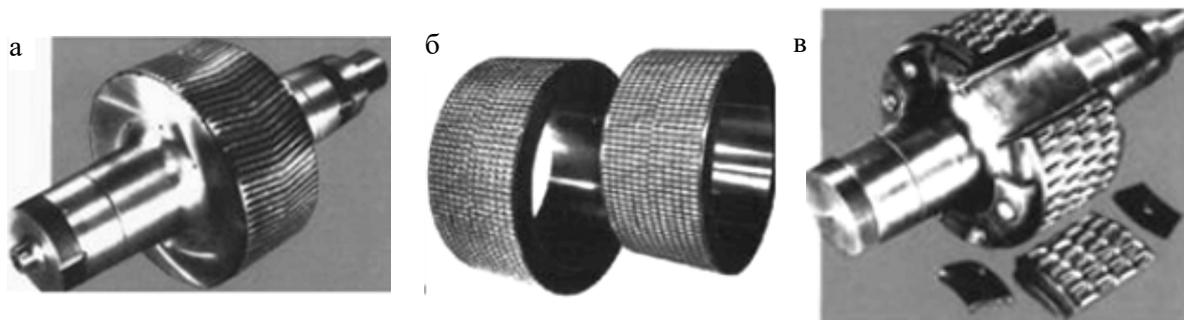
Совершенствование конструкции валков

Это направление повышения эффективности проектируемых и модернизируемых вальц-прессов связано с тем, что от диаметра и ширины валков зависит количество формующих элементов на его рабочей поверхности и, следовательно, производительность пресса. Кроме повышения производительности с увеличением диаметра вала обеспечивается лучшее обжатие материала, и уменьшается его обратный поток из зоны прессования. Однако при этом возрастают металлоемкость и потребление энергии, усложняются конструкторские решения, повышается стоимость изготовления валков. Поэтому значение диаметра валков для прессования сыпучих материалов обычно не превышает 1,0-1,1 м.

Повышение производительности вальц-пресса за счет увеличения ширины валков также имеет ограничения из-за сложности равномерного распределения исходного материала по формующим элементам. Эксплуатационные характеристики валков, в частности, долговечность, зависят от материала, из которого они изготовлены, поэтому обоснование его выбора с учетом абразивных и химических свойств хлористого калия является необходимым условием высокой эффективности вальц-пресса.

По конструкции валки подразделяются на цельные (рисунок 7а) и сборные (рисунок 7б, 7в). Последние оснащаются бандажными кольцами (рисунок 7б) или сменными сегментами (рисунок 7в). Благодаря сборной конструкции повышается ремонтнопригодность валков. Кроме того, применение бандажных колец и сменных сегментов

позволяет изготавливать валки с рациональным сочетанием физико-механических свойств их рабочей и несущей частей, упрощает технологию их восстановления.



**а – цельный валок; б – насадные бандажные кольца валка;
в – валок со съемными сегментами**

Рисунок 7. – Конструктивные исполнения валков

Рабочие поверхности валков должны обладать достаточной износостойкостью и контактной прочностью, поэтому бандажные кольца изготавливаются из легированной износостойчивой стали, например 9ХФ, или легированного чугуна, содержащего около 3 % хрома. Для повышения долговечности наружная поверхность цельных валцов и бандажных колец закаливается на глубину 2,0...2,5 мм.

Преимуществом валков со сменными механически прикрепляемыми сегментами является возможность их быстрой замены, что позволяет уменьшить затраты на техническое обслуживание вальц-пресса. Кроме того, сегментные бандажи, благодаря сборной конструкции, не препятствуют тепловому расширению валков во время работы, что повышает их долговечность.

Основными геометрическими параметрами валков кроме диаметра и ширины являются также форма, размеры и расположение формирующих элементов на его рабочей поверхности [1, 2]. От формы и размеров последних зависят условия захвата валками исходного материала и отделения от них конечного продукта, давление прессования, создаваемое при работе в формирующих элементах, равномерность распределения в них напряжений, условия выхода газов из прессуемого материала, долговечность рабочих поверхностей и т.д., а также затраты на изготовление валков.

Определение рациональных параметров валков и материала их рабочей части требует проведения экспериментальных исследований применительно к конкретным условиям производства и эксплуатации вальц-прессов.

Заключение

Из изложенного следует, что характерными условиями эксплуатации прессового оборудования в калийном производстве является непрерывность работы, абразивность хлористого калия, повышенное давление прессования.

Для получения при требуемой производительности качественного конечного продукта прессовое оборудование, исходя из условий производства, должно обеспечивать стабильную во времени подачу исходного материала в зону прессования, равномерное по ширине валков его распределение и обжатие, достаточную износостойкость рабочих поверхностей валков и высокую ремонтпригодность. В этой связи актуальными задачами совершенствования вальц-прессов, улучшения их технических и эксплуатационных характеристик являются:

- увеличение производительности;
 - уменьшение объема неспрессованного материала;
 - создание условий для равномерного нагружения и изнашивания валков по ширине;
 - обеспечение требуемого качества прессования по ширине формируемой плитки путем равномерного распределения прессуемого материала по ширине валков и его уплотнения с помощью подпрессовщиков, уменьшение содержания воздуха в конечном продукте;
 - повышение долговечности и ремонтпригодности валков за счет рациональной конструкции, обоснованного применения материалов, методов их термической и химико-термической обработки;
 - сокращение затрат на изготовление валков за счет применения эффективных методов их обработки и станочного оборудования.
- Практическое значение имеет разработка методов прогнозирования и оценки остаточного ресурса валков, технологий их восстановления.

Список цитированных источников

1. Грузглина, С.Н. Исследование и совершенствование формующих элементов вальцовых брикетных прессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / С.Н. Грузглина; Днепропетровский горный институт им. Артема. – Днепропетровск, 1973. – 24 с.
2. Баюл, К.В. Разработка параметров формующих элементов валковых прессов для брикетирования мелкофракционных металлургических отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / К.В. Баюл; НМетАУ. – Днепропетровск, 2008. – 20 с.
3. Данилов, В.А. Анализ методов обработки формирующих элементов на валках вальц-прессов фасонными фрезами / В.А. Данилов, В.Я. Прушак, Н.Ю. Кондратчик // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 4. – С. 46-54.
4. Валковый пресс для брикетирования: а.с. 1397309 СССР, МКИ В30В11/18 / И.И. Петроченкова, В.А. Дунаев, В.М. Орлов, С.В. Капленко; Колпинское отделение ВНИ и проектно-конструкторского института металлургического машиностроения «ВНИИМЕТМАШ». – № 4145101/23-27; заявл. 10.11.86; опубл. 23.05.88 // Бюллетень. – 1988. – № 19.
5. Валковый пресс для брикетирования полидисперсных сыпучих материалов: пат. РФ 2450929, МПК В30В15/30, В30В11/18 / В.Я. Шапошников, В.С. Загайнов, П.И. Шамшуринов, М.И. Ступов; ЗАО «Управляющая компания «НКА-Холдинг». – заявл. 02.08.10; опубл. 20.05.12.

Prushak V.Ya., Danilov V.A., Kondratchik N.Yu.

Ways of improving the pressure equipment of potash production

The article describes the main directions of improvement of process and equipment for compacting fine-grained potash chloride in the production of potash fertilizers by rolling it on the roller presses. The ways of efficiency improving of roller presses and density of end-product by means of sustainable compression circuits and design values of its operative parts have been analyzed.

Поступила в редакцию 06.07.2016 г.

УДК 622.788.32:621.926.3(73)(048.8)

ПРОИЗВОДИТЕЛИ ВАЛКОВЫХ ПРЕССОВ ДЛЯ ГРАНУЛИРОВАНИЯ (БРИКЕТИРОВАНИЯ). ОБЗОР 1. США

Зильберглейт М.А. (Институт общей и неорганической химии НАНБ, г. Минск, Беларусь)

В обзорной статье по результатам изучения сайтов производителей валкового оборудования для гранулирования (брикетирования) в США рассмотрены основные фирмы, производящие такое оборудование, технические характеристики оборудования и фотографии некоторых видов прессов. В качестве основных производителей оборудования для гранулирования (брикетирования) были определены следующие фирмы – U.S. ENGINEERING CORPORATION, FEEECO INTERNATIONAL INC., LUDMAN INDUSTRIES, KR KOMAREK INC.

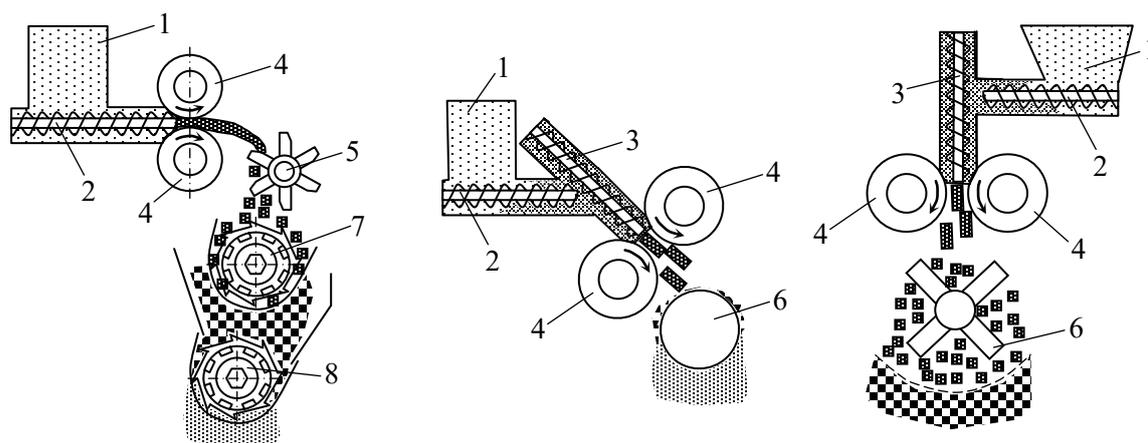
Введение

Целью настоящего обзора является ознакомление производителей, производителей и конструкторов с производителями валковых прессов для гранулирования (брикетирования) из США. Обзор выполнен на основании изучения сайтов производителей и рекламных материалов, поэтому в качестве ссылки используется только эта позиция. Сразу следует отметить, что информация, которую дают о себе производители, не равноценна. Практически каждый производитель предлагает связаться с ними и поставить конкретную задачу. Это и понятно, так как такое оборудование изготавливается под конкретный заказ, что связано не только с производительностью, но и со свойствами перерабатываемого сырья.

Основная часть

Так как большинство производителей в своих проспектах указывает на то, что их продукция пригодна для брикетирования (гранулирования) разнообразной продукции – удобрения, строительных материалов, окалины, химикатов, агропромышленной продукции, фармацевтических препаратов и т.д., то в обзоре не делается попытка оценить и сравнить пригодность того или иного оборудования для этих целей. Принцип работы всего оборудования опирается на одну и ту же конструкцию – сырье в виде порошка попадает чаще всего сверху или реже сбоку в межвалковое пространство, валы на своей поверхности имеют выемки разной формы и/или размеров, в процессе прессования, происходящем при значительном давлении (до 1000 МПа), происходит образование гранул (брикетов), которые собираются в приемник. Давление осуществляется при помощи гидравлической системы на один из валов, который является подвижным. В зависимости от температуры процесс весьма условно делят на процесс горячего и холодного (до 100 °С) брикетирования. При необходимости могут быть использованы связующие. Ниже (рисунок 1) приведены общие схемы процесса, которые не требуют особых комментариев.

U.S. ENGINEERING CORPORATION (AMRUTECH, INC) – выпускает ряд прессов для брикетирования различного сырья [1]. Шесть моделей типа В позволяют работать в диапазоне от 0,5 до 10 тонн в час. Модель В 220А представлена рисунке 2. В таблице 1 приведены основные характеристики этих моделей.



1 – бункер; 2, 3 – питатель (подпрессовщик); 4 – вальцы, 5-8 – разрушитель
Рисунок 1. – Схемы получения гранул (брикетов) методом вальцевания

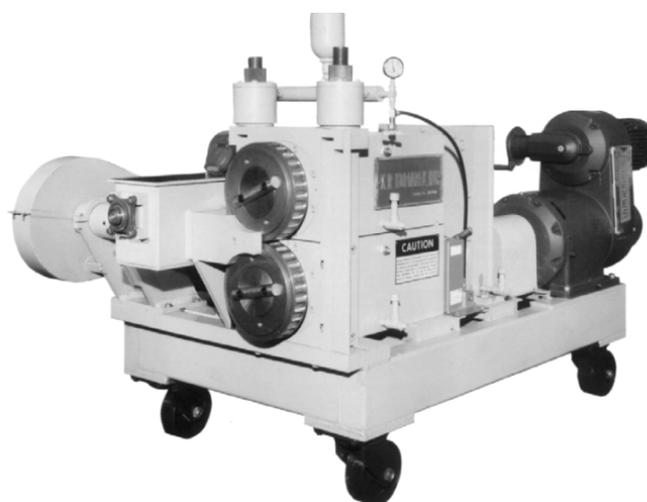


Рисунок 2. – Модель перевозного пресса В 220А

Таблица 1. – Основные характеристики прессов серии В

Номер модели	Диаметр вала, мм	Средняя производительность, т/ч	Средний вес, т
В 100	130	0,5	0,5
В 150	210	0,25	1,0
В 220	305	1,5	4,0
В 300	380	3,0	8,0
В 400	460	5,0	12,0
В 500	610	10,0	20,0

Пресса для горячего брикетирования – серия ДН (рисунок 3, таблица 2). В брикетизирующих машинах данного типа применяется конструкция, предусматривающая расположение рабочей поверхности валков между симметрично расположенными опорами. Данная конструкция позволяет достигать высоких показателей прилагаемого дав-



Рисунок 3. – Брикетировальная машина DH с уплотнителем

ления. Наиболее частое применение данная машина нашла для брикетирования горячих материалов.

Брикетирование предварительно нагретых материалов позволяет улучшить показатели брикетирования и кроме того исключить наличие масла в брикетах, которое имеется, например, при «холодном» брикетировании металлической стружки.

В качестве примера ниже дается более подробное описание модели DH 500-36, применяемой, например, в брикетировании мелочи хромовой руды.

Двухбарабанный брикет – пресс модели DH 500-36. Сжимающее усилие – 300 т, вес ~ 36,4 т.

Таблица 2. – Основные характеристики прессов серии DH

Номер модели	Диаметр вала, мм	Средняя производительность, т/ч	Средний вес, т
DH 100	130	0,1	0,5
DH 300	330	3,0	5,0
DH 300-15	380	4,0	7,0
DH 400	520	9,0	15,0
DH 400-28	710	20,0	18,0
DH 400-36	920	40,0	22,0
DH 500	710	20,0-30,0	25,0
DH 550	920	40,0	45,0

1. Брикетировальные барабаны

Диаметр – 920 мм (36 дюймов), ширина – 260 мм (10,25 дюйма). Каждый барабан состоит из 12 сегментов, изготовленных из абразивостойкого сплава. Барабаны нарезаны тремя рядами в 36 брикетировальных полостей по окружности, которые образуют брикеты размером 76,2×76,2×50,8 мм (3×3×2 дюйма), массой 640 г каждый. Производительность пресса 30 тонн в час при числе оборотов барабана 7,2 об./мин.

2. Валы и подшипники барабанов. Брикетировальные барабаны установлены на валах из стали (сплав AISI 4330). Два выходных вала редуктора соединяются напрямую с валами барабанов пресса с помощью внутреннего зубчатого зацепления с зубьями повышенной прочности.

3. Привод. Брикетировальные барабаны приводятся в действие электродвигателем примерно 140 кВт с передачей. Электродвигатель соединен с двухвальным редуктором ременной передачей. Питание электродвигателя – трехфазное 460 В, 60 Гц. Два выходных вала редуктора скорости соединяются напрямую с валом барабанов пресса с помощью внутреннего зубчатого зацепления с зубьями повышенной прочности. Одно из этих соединений имеет дифференциальное устройство для центровки осей барабанов.

4. Гидравлическая система. Два гидравлических цилиндра размером 305 мм позволяют развивать усилие до 330 тонн при гидравлическом давлении 204 атм. Гидравлическая система позволяет проводить настройку с любой степенью точности для обеспечения оптимального для данного продукта усилия разводки барабанов. Два гидравлических аккумулятора накапливают энергию, необходимую для восстановления положения барабанов после их смещения при кратковременных перегрузках. Система рассчитана на работу при давлениях до 340 атм. Предохранительный клапан срабатывает при давлении 218 атм.

5. Весовой питатель с шибберным барабаном позволяет регулировать подачу сырья на барабаны для получения оптимальных размеров брикетов.

Пример продуктов брикетирования – хлорид натрия (рисунок 4).

FEEECO INTERNATIONAL INC. Фирма, которая производит различные виды собственного сушильного, грануляционного, агломерационного и брикетирующего оборудования [2]. Однако в производстве брикетирующего оборудования объединилась с фирмой Sahut-Conreur С. А. Raismes, Франция, о которой будет речь идти в сообщении, связанном с производителями оборудования в Европе. Ниже мы приводим лишь фото (рисунок 5) брикетирующего пресса фирмы FEEECO INTERNATIONAL INC.



Рисунок 4. – Продукт брикетирования хлорида натрия



Рисунок 5. – Брикетирующий пресс фирмы FEEECO INTERNATIONAL INC.

FLSmith USA Inc. является по сути дела филиалом датско-немецкого концерна **FLSmith**, и поэтому будет рассмотрена в сообщении, связанном с производителями оборудования в Европе.

LUDMAN INDUSTRIES. Машиностроительная и инжиниринговая компания предлагает следующие виды вальц-прессов и компакторов [3]. Брикетирующие прессы модели 1208, 2420, 2826, 3630, 4034 и компактор модели 4440. Характеристика этого оборудования представлена в таблице 3, общий вид пресса и компоновка компактора 4440 – на рисунках 6, 7 и в таблице 4.

Таблица 3. – Характеристика брикетирующих прессов
фирмы LUDMAN INDUSTRIES

Модель	Размеры валка, см		Максимальное давление на валки, т	Размеры пресса, м			Вес пресса без дополнительного оборудования, т	Рекомендуемая мощность, кВт
	диаметр	длина		A	B	C		
1208	12	8	50	1,14	0,81	0,69	2,18	37-55
2408	24	8	80	1,80	0,96	2,52	5,44	55-92
2812	28	12	150	1,80	1,27	2,82	7,48	92-184
2820	28	20	300	2,06	1,63	2,82	16,56	257-331
3624	36	24	450	2,82	2,29	3,43	30,39	368-515
4034	40	34	800	3,02	2,90	4,93	59,42	588-883

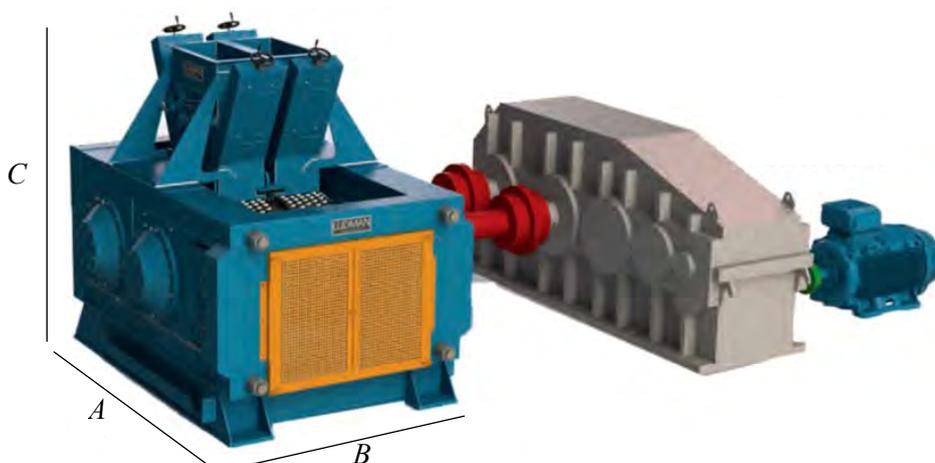


Рисунок 6. – Общий вид пресса 3624

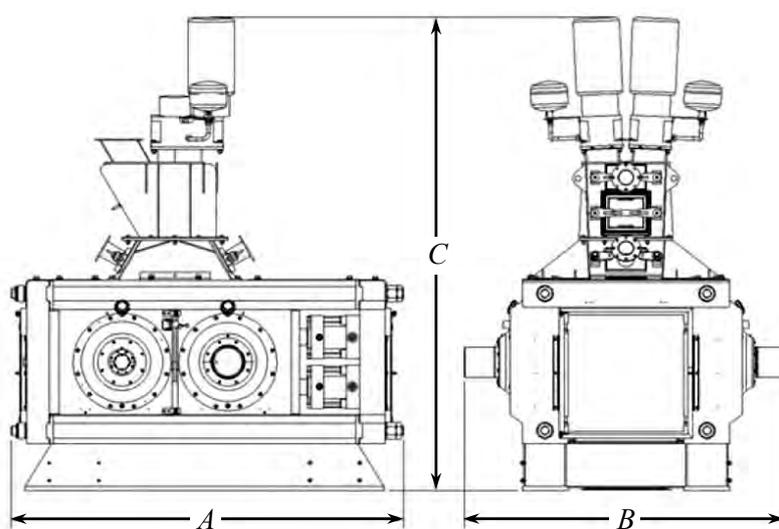


Рисунок 7. – Общая компоновка компактора 4440

Таблица 4. – Характеристика компактора 4440

Модель компактора	Размеры валка, см		Максимальное давление на валки, т	Размеры пресса, м			Вес пресса без дополнительного оборудования, т	Рекомендуемая мощность кВт
	диаметр	длина		A	B	C		
4440	44	40	850	3,30	3,05	4,93	63,05	883-1177

KR KOMAREK INC. Машиностроительная и инжиниринговая фирма с узкой специализацией в области агломерирования и брикетирования [4]. Выпускает прессы высокого и среднего давления, а также лабораторные ролл-прессы. Для прессов характерна горизонтальная подача сырья.

За период своего существования запатентовала 10 изобретений: Процесс брикетирования (Патенты 8070839, 7892302, 20090025285, RE46052), Выдвижное питательное устройство для брикетирующего пресса (Патент 4389178), Брикетирующий валок и сегментная пресс-форма для него (Патент 4306846), Брикетирующий пресс (Патент 4249878), Сегментный брикетирующий валок (Патент 4097215), Бескорпусная брикетирующая машина (Патент 4028035), Брикетирующий валок, имеющий съемные сегменты пресс-формы (Патент 3969062).



Рисунок 8. – Общий вид пресса В400В

Следует также отметить публикации и выступления на всех значимых конференциях, посвященных процессу брикетирования. Всего с 1989 года таких сообщений было 36.

К прессам для высокого давления относятся прессы В220В, В400В. Первая модель имеет небольшую производительность 115-450 кг/ч и мощность 15 кВт, усилие 311 кН, вторая модель 3-10 т/ч и мощность 75 кВт, усилие 1067 кН. Общий вид и компоновка пресса В400В представлены на рисунках 8, 9.

К прессам для умеренного давления представлены серией ДН 300, 400, 450, 500. На рисунке 10 представлены общий вид и компоновка пресса ДН 450, в таблице 5 – технические характеристики прессов серии ДН.

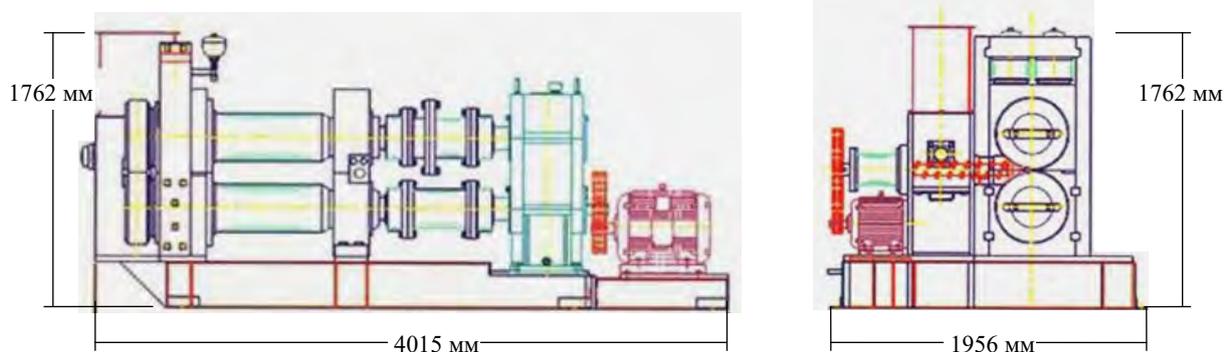


Рисунок 9. – Компоновка пресса В400В

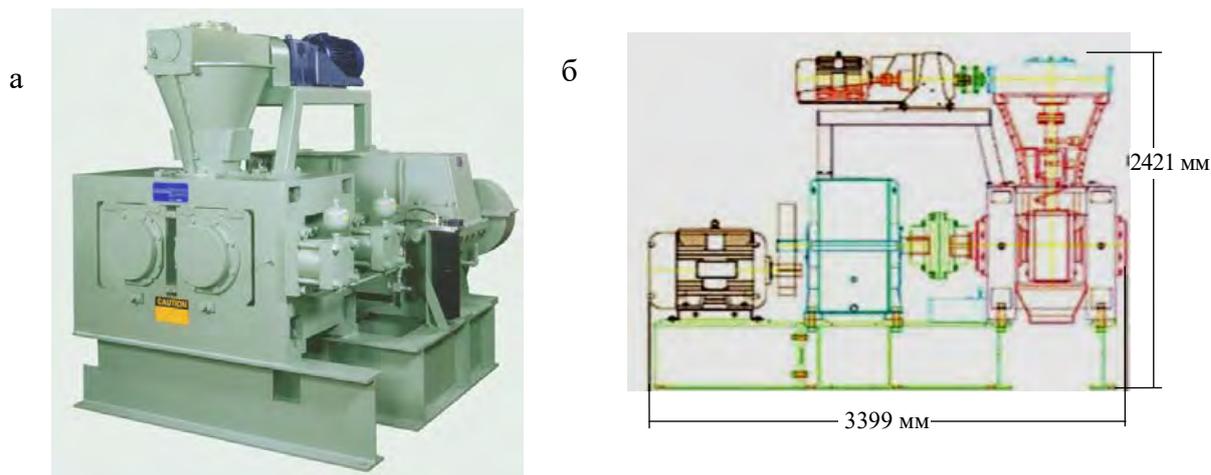


Рисунок 10. – Общий вид (а) и компоновка (б) пресса DH 450

Таблица 5. – Технические характеристики прессов серии DH

Модель	Усилие на вале, кН	Мощность, кВт	Производительность, т/ч
DH 300	670	56	2-10
DH 400	1334	75	4-20
DH 450	1780	112	10-50
DH 500	2936	186	23-50

Лабораторный пресс для научно-исследовательских работ (рисунок 11): производительность 1-25 кг/ч, мощность 1,5 кВт, диаметр рола 100 мм, максимальный размер брикета 34×18×12 мм. Пресс для брикетирования С1235KR с горизонтально расположенным шнеком (рисунок 12) – полных данных нет.



Рисунок 11. – Лабораторный пресс



Рисунок 12. – Пресс для брикетирования С1235KR

Список цитированных источников

1. Amrutech, inc [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.amrutech.com>. – Дата доступа: 15.07.2016.
 2. Feeco international [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://feeco.com>. – Дата доступа: 15.07.2016.
 3. Ludman Industriel [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ludman.net>. – Дата доступа: 15.07.2016.
 4. Komarek Briquetting & Compacting Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.komarek.com/index.html>. – Дата доступа: 15.07.2016.
-

Zilbergleit M.A.

Manufacturers of roller presses for granulation (briquetting). Review 1. The USA

In a review article according to results of the study the sites of rolling equipment manufacturers for granulation (briquetting) in the USA considered the main companies producing such equipment, technical specifications of equipment and photos of some types of presses. As the main equipment manufacturers for granulating (briquetting) were identified the following companies – U. S. ENGINEERING CORPORATION, FEEECO INTERNATIONAL-AL INC., LUDMAN INDUSTRIES, KR KOMAREK INC.

Поступила в редакцию 20.07.2016 г.

УДК 622.673.83-562(045)(476)

ПЕРЕДАЧА ПОТОКА ЭНЕРГИИ ПОСРЕДСТВОМ ТРЕНИЯ МЕЖДУ БАРАБАНОМ (ШКИВОМ) И ЛЕНТОЙ (РЕМНЕМ)

Часть 2. Общий баланс мощности

Казаченко Г.В., Басалай Г.А., Лютко Г.И. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Рассматривается баланс мощности при взаимодействии ленты с ведущим барабаном ленточного конвейера. Общие затраты мощности представляются в виде суммы, состоящей из полезной мощности, а также потерь на трение между лентой и барабаном и на изгиб ленты. Предложены зависимости для оценки этих потерь в функциях передаваемого полезного усилия, размеров устройств, режимов их работы и свойств материалов ленты или ремня.

Введение

В первой части [1] настоящего исследования предложены зависимости, позволяющие определить тяговые усилия ленты конвейера и ремня плоскоременной передачи в зависимости от передаваемой мощности, конструктивных размеров и режимных параметров, коэффициента трения и буксования ленты. При этом не учитывались затраты энергии на изгиб ленты. На наш взгляд, это допустимо в тех случаях, когда рассматриваются ленты и ремни малой толщины без армировки. Если поперечное сечение ленты имеет значительное сечение и тем более армировано кордом, то необходимо учитывать затраты энергии не только на скольжение ленты по барабану, но и на ее изгиб. Рассмотрению этого процесса и баланса энергии посвящается вторая часть работы.

Содержание исследования

Естественно, что затраты энергии на изгиб ленты или ремня, в первую очередь, зависят от величины изгибающего момента. Для его определения рассмотрим эпюру относительных деформаций в сечении ленты на барабане, вызванных напряжениями изгиба (рисунок 1), которые возникают вследствие огибания барабана лентой.

При построении эпюры считается, что деформации материала ленты подчиняются закону Гука, т.е. принимается

$$\sigma_u = \delta \cdot E, \quad (1)$$

где σ_u – напряжение изгиба;

δ – относительные деформации материала ленты за счет изгиба;

E – модуль упругости материала ленты или ремня. Далее, как и в первой части статьи, употребляем термины «лента» и «барабан».

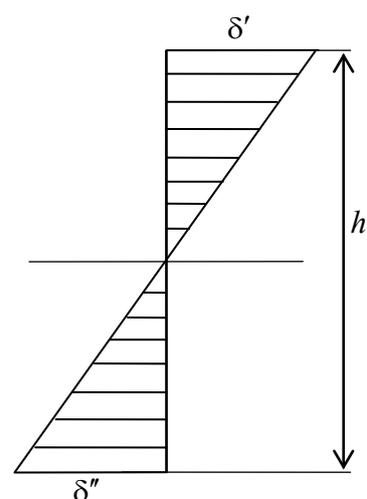


Рисунок 1. – Эпюра относительных деформаций в сечении ленты на барабане, вызванных ее изгибом

Наибольшие относительные деформации за счет изгиба ленты согласно рисунку 1 выражаются соотношениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta' = \frac{(r+h) - \left(r + \frac{h}{2}\right)}{r + \frac{h}{2}} = \frac{h}{2r+h}; \\ \delta'' = -\frac{r - \left(r + \frac{h}{2}\right)}{r + \frac{h}{2}} = -\frac{h}{2r+h}, \end{array} \right. \quad (2)$$

где δ' , δ'' – относительные деформации растяжения и сжатия на верхней и нижней границах ленты (рисунок 1);

r – радиус барабана;

h – толщина ленты.

Изгибающий момент в сечении ленты

$$M_u = \sigma_u \cdot W = \frac{b \cdot h^3}{6(2r+h)} E, \quad (3)$$

где W – момент сопротивления сечения ленты, $W = (b \cdot h^2)/6$;

b – ширина ленты.

Здесь в первом приближении момент сопротивления сечения ленты принимается в предположении, что это сечение однородно. На самом деле в сечении есть различные по форме и механическим свойствам материалы. Тогда E – это приведенный модуль упругости материала ленты. Его значение можно найти по техническим характеристикам ленты.

Таким образом, мощность, которая тратится на изгиб ленты,

$$N_u = M_u \cdot \omega = \omega \cdot E \frac{b \cdot h^3}{6(2r+h)}, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость изгиба ленты, $\omega = v_l/r$;

v_l – скорость ленты.

Эта скорость меньше окружной скорости барабана на величину скорости скольжения

$$v_{ск} = \omega \cdot r \cdot \varepsilon, \quad (5)$$

где ε – коэффициент скольжения, $\varepsilon = v_{ск}/(\omega \cdot r)$.

Таким образом, скорость ленты

$$v_l = \omega \cdot r - v_{ск} = v(1 - \varepsilon). \quad (6)$$

Оценим также потери мощности по причине скольжения ленты по барабану.

Эти потери можно вычислить по формуле

$$N_m = T \cdot v_{ск} = T \cdot \omega \cdot r \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

где T – окружная сила трения между лентой и барабаном, $T = S_1 - S_2$;

S_1 и S_2 – натяжения ленты в начале и конце ее контакта с барабаном.

Считая, в соответствии с первой частью исследования, коэффициент скольжения ε функцией передаваемого окружного усилия T и используя упрощенный вариант этой функции, т.е. подставив вместо ε его значение из [1], получим

$$N_m = \frac{k \cdot P \cdot T^2 \cdot v}{\sqrt{f^2 \cdot P^2 - T^2}}, \quad (8)$$

где k – коэффициент, учитывающий поперечные деформации материалов ленты и барабана в зоне их контакта;

P – равнодействующая сил давления ленты на барабан;

f – коэффициент трения между лентой и барабаном.

Используя соотношения (7) и (4) можно составить энергетический баланс передачи мощности посредством трения с барабана на ленту

$$M_o \cdot \omega = N_n + N_m + N_u, \quad (9)$$

где M_o – момент, передаваемый от привода на барабан, $N_o = N_o/\omega$;

N_o – общие затраты мощности на работу барабана;

N_n – полезная мощность, сообщаемая ленте от барабана.

Из последнего соотношения можно найти крутящий момент на барабане, который необходим для обеспечения необходимой разности натяжений ленты

$$M_o = (S_1 - S_2) r + E \frac{b \cdot h^3}{6(2r + h)} + \frac{k \cdot P \cdot T^2 \cdot r}{\sqrt{f^2 \cdot P^2 - T^2}} \quad (10)$$

При записи приведенных зависимостей принято, что диссипация энергии при трении ленты и ее изгибе выражается посредством нагрева ленты и барабана, а также окружающей среды.

Так как равнодействующая P нормальных давлений ленты на барабан и сила T трения между ними являются функциями натяжения ленты в точках ее входа и выхода на барабане [1-3], то зависимости (10), (8) и (7) позволяют найти основные энергетические и силовые характеристики взаимодействия ленты с барабаном.

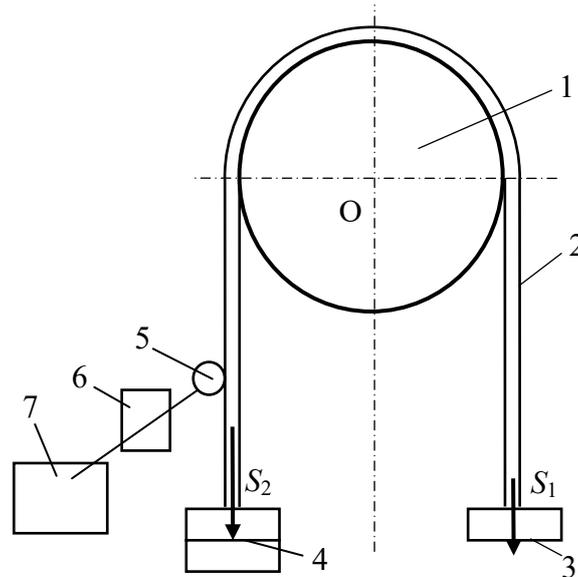
Для их нахождения необходимо знать два коэффициента f и k , с помощью которых моделируется взаимодействие ленты с барабаном. Определение этих коэффициентов может производиться с помощью специального стенда. Принципиальная схема стенда приведена на рисунке 2. Измерительные средства позволяют регистрировать и записывать в память ЭВМ скорость движения ленты по барабану, момент на котором также регистрируется.

Методические основы нахождения коэффициентов f и k заключаются в том, что набором грузов 3 и 4 создается режим скольжения ленты по неподвижному барабану с небольшой скоростью. Используя измеренные значения S_1 и S_2 , можно в первом приближении найти значение коэффициента f . Действительно, согласно первой части исследования при угле контакта ленты с барабаном, равном π ,

$$S_1 (1 - f) = S_2 (1 + f). \quad (11)$$

Отсюда находим значение коэффициента трения

$$f = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2}. \quad (12)$$



1 – барабан; 2 – лента; 3, 4 – площадки и грузы для создания натяжений ленты;
5 – датчик перемещения ленты; 6 – устройства преобразования
сигнала датчика; 7 – ПЭВМ

Рисунок 2. – Схема стенда для изучения взаимодействия конвейерной ленты с барабаном

При вычислении f по этой формуле следует принимать во внимание тот факт, что при ее получении не учитываются затраты энергии на изгиб ленты.

Значение коэффициента k может быть найдено из формулы (8) после определения значения f

$$k = \frac{N_m \cdot \sqrt{f^2 \cdot P^2 - T^2}}{P \cdot T^2 \cdot v}, \quad (13)$$

где N_m находится по формуле (7).

Коэффициенты f и k можно также найти путем решения системы из двух уравнений, составленных для различных пар значений S_1 и S_2 .

Эти уравнения можно составить на основе величин, измеряемых на стенде (рисунок 2). Так как в процессе проведения экспериментов можно измерить скорость скольжения ленты по неподвижному барабану при заданных значениях усилий S_1 и S_2 , то после проведения двух серий опытов можно составить следующую систему уравнений

$$\begin{cases} S'_1 - S'_2 = f (S'_1 + S'_2) \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 (S'_1 + S'_2)^2}}; \\ S''_1 - S''_2 = f (S''_1 + S''_2) \frac{1}{\sqrt{1 + k^2 (S''_1 + S''_2)^2}}, \end{cases} \quad (14)$$

где S'_1, S'_2 – значения натяжений ленты в первой серии опытов;

S''_1, S''_2 – значения натяжений ленты во второй серии опытов.

Эта система представляет собой условия равновесия ленты на барабане, нагруженной разными по величине грузами и скользящей по барабану с постоянной скоростью. Измерительная система стенда, а также методика проведения опытов и обработки опытных данных и их интерпретация требуют специального рассмотрения. Здесь мы

приводим только принципиальную возможность определения коэффициентов f и k . Возведя левые и правые части уравнений (14) в квадрат, имеем систему линейных уравнений относительно k^2 и f^2

$$\begin{cases} f^2 (S'_1 + S'_2)^2 = k^2 (S'_1 + S'_2)^2 (S'_1 - S'_2)^2 - (S'_1 - S'_2)^2 = 0; \\ f^2 (S''_1 + S''_2)^2 = k^2 (S''_1 + S''_2)^2 (S''_1 - S''_2)^2 - (S''_1 - S''_2)^2 = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Определив из этой системы f^2 и k^2 , легко находятся значения коэффициентов f и k .

Заметим, что рассматриваемый способ определения этих коэффициентов требует достаточно высокой тщательности проведения опытов и статистической обработки опытных данных.

Заключение

Проведенное в настоящей работе исследование позволяет вести расчет плоскоремennых передач и ленточных конвейеров на основе закона сухого трения, учитывающего скольжение трущихся тел и затраты энергии на изгиб ленты на барабане. Достоинством предлагаемой методики расчета является то, что взаимодействие ленты с барабаном моделируется с помощью двух коэффициентов k и f . Первый из них является известным коэффициентом трения скольжения. Второй коэффициент k является размерным и требует специальных экспериментальных определений. В работе предложены два метода его определения. Таким образом, содержание статьи позволяет рассчитать взаимодействие ленты с ведущим барабаном конвейера (ремня плоскоремennой передачи со шкивом) новым способом, основным на использовании зависимости силы трения от скорости скольжения.

Список цитированных источников

1. **Казаченко, Г.В.** Передача трением усилий со стороны барабана (шкива) на ленту конвейера (ремня). Часть 1. Моделирование взаимодействия ленты с барабаном / Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2016. – № 2. – С. 78-85.
2. **Федоров, С.В.** Теория ременных передач с учетом уравнения энергетического баланса трения / С.В. Федоров, Д.В. Афанасьев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 3, № 3-4. – С. 892-899.
3. **Скойбеда, А.Т.** Ременные передачи / А.Т. Скойбеда. – Минск: Наука и техника, 1995. – 385 с.

Kazachenko G.V., Basalai R.A., Lyutko G.I.

Energy flow transmission through friction between a drum (pulley) and a belt (strap). Part 2. Overall power balance

The article studies the power balance in the interaction of a belt with a belt conveyor driving drum. Total power outlay are represented as the sum consisting of the useful power as well as friction losses between the belt and the drum and belt bending losses. The laws for estimating these losses in the functions of transmitted useful effort, device sizes, modes of operation and material properties of belt and strap have been proposed.

Поступила в редакцию 15.08.2016 г.

УДК 661.832'032.1:621.777(047)(476)

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕССОВАНИЯ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ

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

Предлагаются конструктивные решения, направленные на повышение эффективности прессования сыпучих материалов, в частности, хлористого калия, и улучшение параметров выхода прессованного продукта.

Введение

Экономия и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение качественной конкурентоспособной продукции, является первоочередной задачей в условиях сложившейся экономической ситуации в Республике Беларусь. В этой связи необходимо внедрять новые технологии, позволяющие снизить энерго- и ресурсоемкость производства гранулированного комплексного удобрения. Мелкозернистый концентрат хлористого калия, полученный флотационным и галургическим методами, не соответствует требованиям к гранулометрическому составу калийных удобрений, поэтому технология их производства включает процесс прессования. Полученный на этой стадии производства спрессованный в плитку материал далее подвергают дроблению и классификации с целью отделения кондиционной фракции от остаточного продукта, подлежащего последующей переработке в гранулы нужного размера.

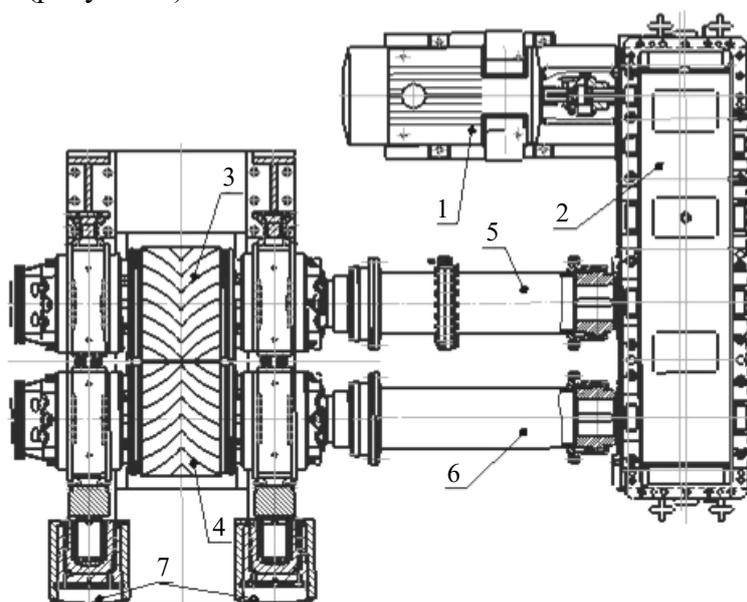
Эффективность технологии производства калийного удобрения во многом зависит от совершенства применяемого прессового оборудования. Из множества известных в промышленности методов прессования порошкообразных материалов в калийном производстве применяется прессование мелкозернистого хлористого калия на вальц-прессах, обеспечивающих непрерывность и высокую производительность процесса (до 70 т/ч и более) при относительно небольших затратах энергии и эксплуатационных расходах по сравнению с другими видами прессования.

Обычно устройства для прессования хлористого калия включают установленные с возможностью встречного вращения параллельные приводные валки, смонтированные на раме и имеющие рельефный профиль [1]. Валки оборудованы гидроцилиндрами прижима одного к другому. Над валками монтируется подпрессовщик в виде нескольких расположенных над межвалковым пространством вертикальных шнеков, предварительно уплотняющих и подающих в зону прессования сыпучий материал. Под валками установлена течка с отводящим рукавом и с пробоотборником. Спрессованная плитка попадает в течку с отводящим рукавом, через который самотеком попадает в дробильное оборудование и далее – на гранулирование. Из пробоотборника течки имеется возможность извлекать образцы плитки для контрольной проверки ее плотности.

Практический опыт эксплуатации валковых прессов при производстве хлористого калия показывает, что не всегда обеспечивается равномерное распределение прессуемого материала по ширине валков и полное исключение из него газов, из-за чего воздушные пузырьки разрыхляют прессуемую плитку, это не позволяет в должной степени управлять предварительным уплотнением исходного материала и, следовательно, давлением прессования. А значит, велика вероятность получения плитки ненадлежащей и неравномерной плотности, что снижает качество получаемого гранулированного удобрения.

Особенности конструкций устройств для прессования

Специалисты ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» спроектировали и выпускают прессы валковые уникальных конструкций, основываясь на тщательном анализе недостатков существующих. Реализован и запатентован ряд идей, способствующих улучшению воздухоотвода из пресуемого материала из зоны прессования. Для этого сначала было предложено оборудовать пресс валковый дополнительным горизонтальным подпрессовщиком с воздухоотводящим каналом. Затем профиль поверхности валков выполнили в виде круговых шевронных канавок, расположенных на обоих валках навстречу друг другу, причем каждый приводной валок посадили на отдельный выходной вал редуктора одного привода с возможностью регулирования положения рабочих поверхностей валков относительно друг друга (рисунок 1).



1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3, 4 – валки с профильной поверхностью;
5, 6 – выходные валы редуктора; 7 – гидроцилиндры прижима валка 4 к валку 3

Рисунок 1. – Узел привода валков пресса валкового

Валки 3 и 4, вращаясь во встречном направлении, круговыми шевронными канавками на своих рабочих поверхностях захватывают и затягивают мелкозернистое сыпучее удобрение в зону прессования. Гидроцилиндры 7 прижимают валок 4 к валку 3, создавая давление в межвалковом пространстве, необходимое для спрессовывания сыпучего материала в плотную плитку. При этом, благодаря круговым канавкам, выполненным на цилиндрической поверхности валков, пузырьки воздуха выдавливаются из зоны прессования по канавкам, где находится еще неспрессованный сыпучий материал и отвод воздушных пузырьков более благоприятен. Благодаря улучшенному воздухоотводу, пузырьки не разрыхляют пресуемый материал, условия прессования улучшаются, плитка удобрения получается более плотная, более качественная, производительность прессования увеличивается. Шевронное расположение круговых канавок исключает воздействие осевых усилий на подшипники, что благоприятно сказывается на долговечности оборудования валкового пресса. Таким образом, выполнение профиля рабочей поверхности валков пресса в виде круговых шевронных канавок позволяет повысить производительность прессования калийного удобрения за счет улучшенного затяги-

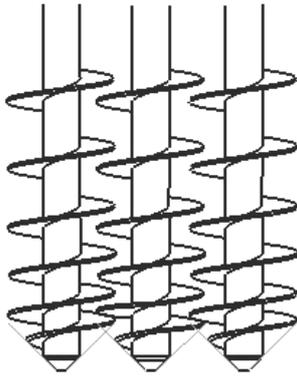


Рисунок 2. – Шнеки подпрессовщика с переменным шагом

вания сыпучего материала в зону прессования, улучшенного воздухоотвода из этой зоны, что в итоге обеспечивает получение продукции более высокого качества. Еще одна идея, основанная на вероятности разрыхления прессуемого материала воздушными пузырьками, захваченными вместе с материалом, которые после резкого сжатия валками не имеют возможности выхода из него. Эта мысль подтолкнула на разработку шнеков подпрессовщика с переменным шагом винтовой наливки, постепенно уменьшающимся от загрузочной шахты к межвалковому пространству (рисунок 2). Материал захватывается всеми тремя шнеками и увлекается в межвалковое пространство. Винтовая наливка каждого из шнеков, с постепенно уменьшающимся от загрузочной шахты в сторону межвалкового пространства шагом, постепенно увеличивает давление внутри сыпучей массы материала по мере его продвижения в сторону межвалкового пространства. Материал уплотняется постепенно благодаря переменному шагу витков шнеков. Вначале, происходит более легкий отток воздуха из массы материала через штуцеры отвода воздуха и пыли из корпуса подпрессовщика. Затем шаг винтовой наливки шнека уменьшается, сыпучий материал уплотняется интенсивнее, но и пузырьков воздуха, препятствующих этому процессу, уже осталось меньше, в результате чего облегчаются условия для прессования. Из-за того, что шнеки расположены в ряд над линией межвалкового пространства, создается одинаковое давление по всей ширине прессования, вынуждающее уплотненный материал поступать в межвалковое пространство равномерным плотным потоком, который спрессовывается валками 3 и 4. Таким образом, на выходе из пресса валкового получают спрессованную плитку одинаковой плотности, которая регулируется прижимом одного валка к другому при помощи гидроцилиндров 7 прижима валка 4 к валку 3 (рисунок 1).

Кроме того, весьма важно изготавливать плитку одинаковой заданной плотности для получения при последующем дроблении гранулированного калийного удобрения равномерного гранулометрического состава. Специалисты ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» разработали конструкцию устройства для прессования с автоматическим регулированием плотности прессования.

Гидравлическая система устройства для прессования дополнительно содержит по два гидроаккумулятора, каждый из которых соединен со своим гидроцилиндром прижима одного из валков к другому (рисунок 3). Валки между собой соединены системами пружин с предварительным сжатием.

Толщину прессования регулируют количеством подачи материала в межвалковое пространство и гидроцилиндрами прижима подвижного валка 4 к неподвижному валку 3. В гидравлической системе валкового пресса, к которой подключен гидроаккумулятор 1, предварительно создается определенное давление. Величина этого давления вычисляется опытным путем, и соответствует давлению, при котором плотность прессуемой плитки соответствует требуемой. Зона прессования по бокам ограничена боковыми уплотнителями 2. Оба валка 3 и 4 имеют рельефный профиль и, вращаясь во встречном направлении, непрерывно прессуют сыпучий материал в плотную плитку, в сечении отображающую рельефный профиль валков. Боковые уплотнители 2 формируют края прессуемой плитки и предохраняют их от осыпания. Ими можно регулировать ширину прессуемой плитки.

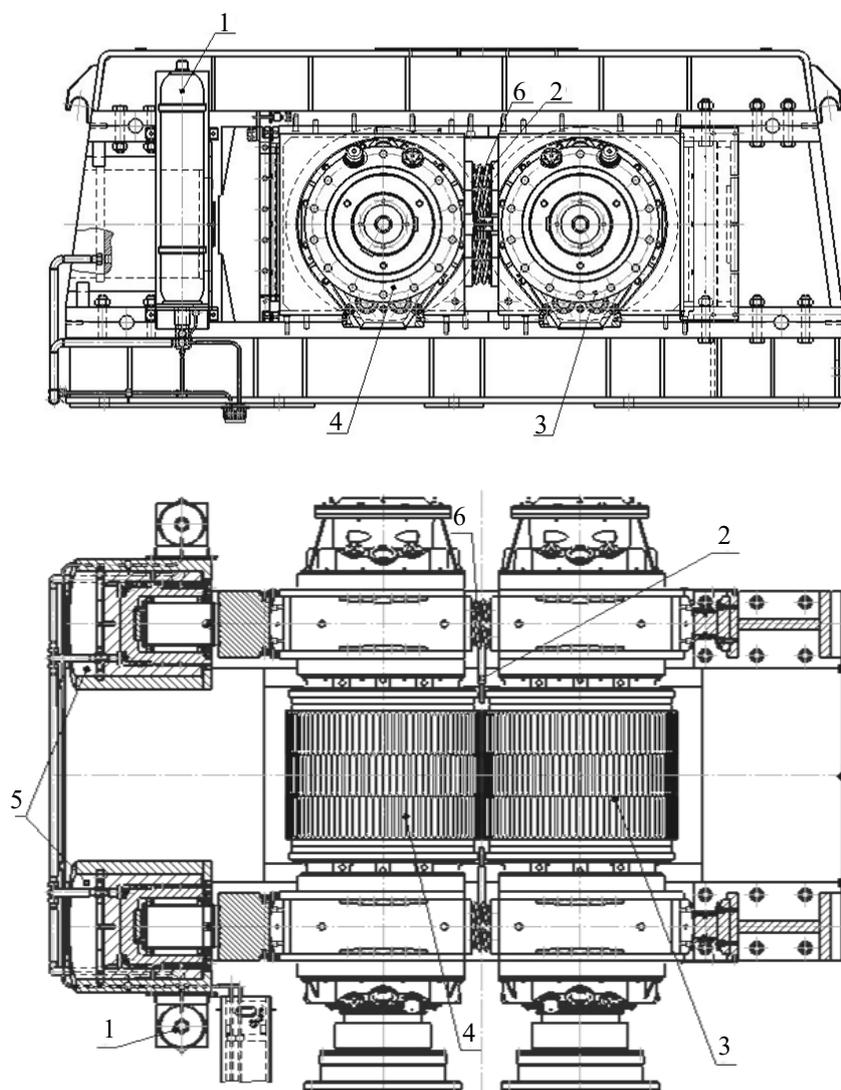


Рисунок 3. – Валковый пресс, оборудованный гидроцилиндрами прижима с гидроаккумуляторами

Количество подаваемого материала в каждый момент времени может несколько различаться. В случае некоторого случайного уменьшения количества подаваемого материала от некоторого среднего значения давление в полости гидроцилиндра 5 снижается. Этого давления будет недостаточно для обеспечения заданной плотности плитки, что недопустимо из-за снижения качества получаемой продукции. Как только значение давления в полости гидроцилиндра 5 начинает снижаться, его величина компенсируется давлением заряженного гидроаккумулятора 1. И гидроцилиндром 5 валок 4 прижимается с той же силой к валку 3, обеспечивая требуемые условия прессования и заданную плотность изготавливаемой плитки. Если количество сыпучего материала, подаваемого в межвалковое пространство, в некоторый момент времени случайно превысит среднее значение, давление в полости гидроцилиндра 5 возрастет, но посредством гидроаккумулятора 1 тут же снизится до среднего.

Иногда в сыпучем материале, который подается в зону прессования, попадают посторонние крупные твердые предметы, которые способны заклинить валки, что может привести к поломке. Проще в таких случаях пропустить их через зону межвалкового пространства без давления, а потом уже извлечь. В таком случае крупный твердый

предмет, попавший в межвалковое пространство и затягиваемый валками дальше, оказывает воздействие на подвижный валок 4. В полости гидроцилиндра 5 при этом создается избыточное давление, которое компенсируется гидроаккумулятором 1. Однако, если попавший предмет слишком большой, то давление в гидроцилиндрах 5 будет продолжать расти, и, превысив возможности гидроаккумулятора 1, избыток масла будет сброшен в общую гидросистему устройства для прессования.

После того, как твердый предмет пройдет сквозь межвалковое пространство и попадет далее в течку, его можно извлечь через пробоотборник. Затем снова поднимают давление в гидравлической системе, а, соответственно, и в гидроаккумуляторе 1 до оптимального и продолжают процесс прессования валками 3 и 4 при помощи гидроцилиндра 5 прижима в прежнем рабочем режиме.

Для того, чтобы облегчить демонтаж валков при отсутствии давления в гидравлической системе пресса валкового, предусмотрена система предварительно сжатых пружин 6, работающих на разжим, которая предусматривает гарантированный зазор между валками 3 и 4.

Заключение

Таким образом, оборудование гидроцилиндров подвижного валка вальц-пресса гидроаккумуляторами позволяет поддерживать постоянное давление в гидроцилиндрах прижима, а значит – постоянное давление подвижного валка на неподвижный и, соответственно, на прессуемый материал, обеспечивая одинаковую плотность прессуемой плитки, толщина которой регулируется прижимом одного валка к другому при помощи гидроцилиндров. Выполнение профиля рабочей поверхности валков пресса валкового в виде круговых шевронных канавок позволяет повысить производительность прессования сыпучего материала за счет улучшенного затягивания сыпучего материала в зону прессования, улучшенного воздухоотвода из этой зоны, что в итоге обеспечивает получение продукции более высокого качества. Кроме того, в случае попадания в межвалковое пространство посторонних крупных твердых предметов гидроаккумуляторы автоматически сбрасывают давление, отключая прижим гидроцилиндрами одного валка к другому, позволяют избегать заклиниваний и поломок вальц-пресса в процессе работы. Система пружин обеспечивает гарантированный зазор между валками для облегчения условий демонтажа.

Список цитированных источников

1. Устройство для прессования хлористого калия: пат. 2105 Респ. Беларусь, МПК 7B30B11/16 / В.Я. Прушак, А.Н. Башура, В.Я. Щерба, В.М. Кириенко, И.А. Конопляник, А.А. Китун; заявитель ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № u 20040255; заявл. 27.05.04; опубл. 30.09.05 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 3 (46). – С. 47.

Prushak V.Ya., Shcherba Ye.V., Kondratchik N.Yu., Volchek O.M.

Constructive ways of efficiency upgrading of potassium chloride compacting

Constructive decisions aimed at efficiency upgrading of bulk materials compacting, in particular, potassium chloride, and improvement of compact product output parameters are offered.

Поступила в редакцию 23.08.2016 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.22:621.79.01:678.033:678.742

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ТЕРМОПЛАСТОВ**Антонов А.С.¹, Ищенко М.В.², Бурцев А.Н.², Струк В.А.¹¹УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь²ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь

Исследованы параметры структуры, деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик композиционных материалов на основе смесей термопластов при различных технологиях совмещения компонентов. Разработаны составы конструкционных и триботехнических материалов для изготовления изделий и покрытий для конструкций технологического оборудования, автокомпонентов и оснастки.

Введение

В номенклатуре функциональных полимерных композитов определяющее место занимают смесевые материалы на основе полимерных и олигомерных компонентов. Совмещение матричного связующего с полимерным или олигомерным модификатором позволяет достичь необходимый диапазон параметров эксплуатационных характеристик, обеспечивающий заданный ресурс изделия в конкретных условиях его применения.

Существенной проблемой обеспечения стабильных параметров структурных характеристик смесевых композитов, определяющих нагрузочно-скоростной и температурный диапазон применения изделий в статических и динамических конструкциях узлов и агрегатов различного назначения, является преодоление выраженной термодинамической несовместимости полимерных и олигомерных компонентов, обусловленной особенностями состава, структуры макромолекулы, различием реологических, теплофизических и др. характеристик. Поэтому в технологии смесевых композитов используют специальное оборудование (двухшнековые смесители, установки для механохимического совмещения и высокоэнергетического воздействия) и специальные добавки – компатибилизаторы, повышающие межмолекулярное взаимодействие компонентов в смесевом композите.

При мелкосерийном и экспериментальном производстве изделий использование дорогостоящего технологического оборудования неэффективно и снижает конкурентоспособность продукции. Вместе с тем, проведенные исследования специалистами ведущих отечественных и зарубежных школ в области материаловедения и технологии полимерных композитов свидетельствуют о возможности получения изделий из смесевых материалов с использованием распространенного оборудования – шнековых и лопастных смесителей и термопластавтоматов [1-11].

В этом аспекте целесообразно рассмотрение научных подходов к получению смесевых композитов с заданными параметрами эксплуатационных характеристик путем повышения термодинамической совместимости с использованием феномена наносостояния. Поэтому существенный научный и практический интерес представляют фи-

зико-химические и структурные превращения при совмещении полимерных и олигомерных компонентов, близких по молекулярному строению, с использованием наноразмерных функциональных модификаторов различного состава и строения.

Основная часть

Цель исследования состояла в разработке составов конструкционных и триботехнических материалов на основе смесей термопластов для конструкций технологического оборудования и автокомпонентов повышенного ресурса.

Объекты и методика исследований. В качестве компонентов для получения совмещенных матриц и композитов различного назначения использовали термопластичные полимеры и олигомеры, наиболее распространенные в материаловедении и технологии полимерных материалов: алифатические полиамиды – ПА 6-210/310 низковязкий, ПА 6.6-Л (Филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»), ПА 66/6 Grilon TSS/4, ПА 12 Grilamid L20 (EMS-CHEMIE AG, Швейцария), ПА 11 Rilsan (Arkema, Франция), полиолефины – ПП, ПЭВД, ПЭНД (ОАО «Полимир»), полиэфиры – ПЭТФ, ПБТФ первичные (ОАО «Могилевхимволокон») и регенерированные (ОАО «Белвторполимер»), фторсодержащие соединения – политетрафторэтилен (ПТФЭ) Ф4 и Ф4-М (ОАО «Галоген», Россия), фторсодержащие олигомеры «Фолеокс» (ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. академика С.В. Лебедева», Россия), продукты термогазодинамического синтеза ПТФЭ под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, Россия).

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

Совмещение компонентов осуществляли по технологиям экструзионного смешивания на двухшнековом экструдере MPC 67/2 фирмы «Компекс», термомеханического смешивания в материальном цилиндре литьевой машины Battenfeld серии TM (Wittmann Battenfeld GmbH, Германия) и осаждения дисперсных частиц из псевдооживленного слоя на твердом субстрате (установка ГНУ «ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси») при режимах, регламентированных производителями оборудования.

Физико-химические процессы на границе раздела фаз в смесевых композитах и металлополимерных системах исследовали с применением современных методов анализа: ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон-3,0), ДТА (Thermoscan-3), атомно-силовой (АСМ), электронной растровой (РЭМ) и оптической (ОМ) микроскопии с применением оригинальных приборов (Mira, Tescan, NT-206, MDS). Энергетическое состояние компонентов оценивали методом спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ-анализа) на установке ОДО «Микротестмашины».

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных характеристик композиционных материалов и покрытий определяли по общепринятым методикам с использованием стандартных и рекомендованных образцов по действующим стандартам РБ или нормативной документации разработчика на специализированном оборудовании Z010 Zwick, FT-2. Реологические параметры компонентов и смесей исследовали на приборе ИИРТ-119.

Стендовые и производственные испытания изделий из разработанных композиционных материалов и покрытий проводили на ОАО «Белкард», ОАО «Белвторполимер»,

ПУП «Цветлит», ЗАО «Солигорский Институт проблем перусосбережения с Опытным производством».

Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программных продуктов «Statistica».

Результаты и обсуждение

В Институте химии ДВО РАН разработана технология получения высокодисперсных продуктов с размером единичных частиц в диапазоне 5-50 мкм путем термического воздействия на блочные полуфабрикаты ПТФЭ в защитной среде – технология термогазодинамического синтеза (ТГДС) политетрафторэтилена с получением ультрадисперсных частиц УПТФЭ. Исследованиями разработчика технологии ТГДС Цветникова А.С. и сотрудниками показано, что основным механизмом формирования частиц УПТФЭ являются процессы реполимеризации газообразных продуктов термодеструкции ПТФЭ со строением, близким к строению мономера (тетрафторэтилена), на активных центрах элементов технологической установки с образованием фракций, идентичных по строению, молекулярной массе и параметрам деформационно-прочностных и теплофизических характеристик к исходному ПТФЭ [11].

Учитывая перспективы использования УПТФЭ при создании композиционных материалов для малоизнашивающихся адгезионных, триботехнических и герметизирующих систем, были выполнены системные исследования особенностей состава, строения и параметров характеристик продуктов ТГДС политетрафторэтилена с торговой маркой «Форум».

Морфологический анализ промышленных порошкообразных продуктов ПТФЭ марки Ф-4 (Ф-4М) и УПТФЭ («Форум»), проведенный методом РЭМ (рисунок 1), свидетельствует о характерных отличиях, которые предполагают различное строение частиц, полученных по технологиям нетрадиционного синтеза и ТГДС. Характерная морфология частиц ПТФЭ (рисунок 1а) обусловлена особенностями синтеза из газообразных мономеров (тетрафторэтилена) в присутствии катализаторов полимеризации при определенных значениях температуры и давления в реакционном объеме. Выраженная сферическая форма частиц УПТФЭ и их повышенная пластическая деформативность (рисунок 1б) свидетельствуют об их полифракционном строении.

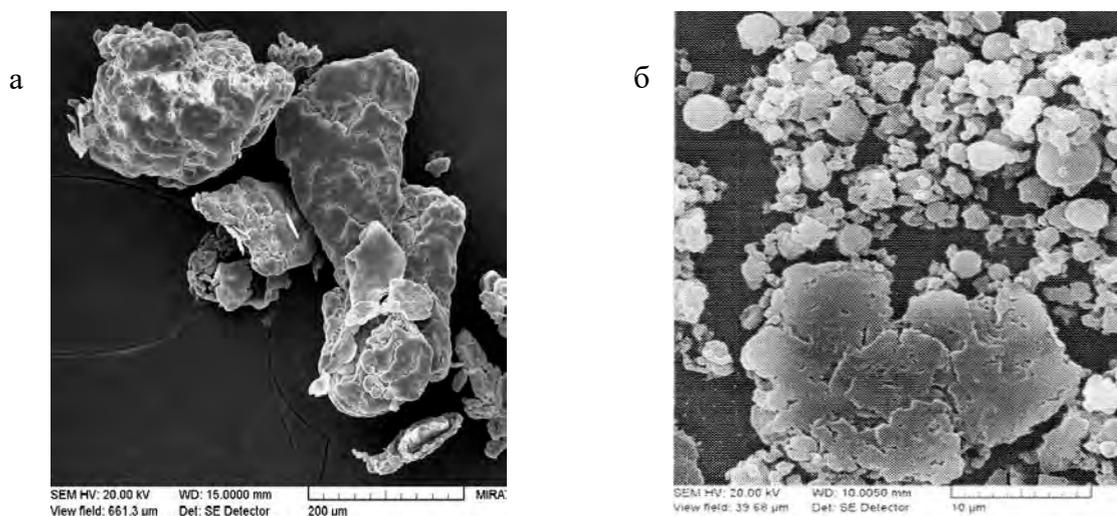


Рисунок 1. – Характерная морфология частиц промышленных марок ПТФЭ (Ф-4) (а) и УПТФЭ («Форум») (б). Метод РЭМ

Исследования теплофизических характеристик методом ДТА свидетельствуют об многофазном составе с различными температурами плавления и сублимации, проявляющимися в диапазоне температур 333-473 К с характерными эндоэффектами и дифференциальными эффектами потери массы на кривых ДТГ и ДТА при 333 К, 563 К, 710 К, 720 К, 730 К и 763 К. Сравнительный анализ ИК-спектров и данных ДТА модельных образцов ПТФЭ (Ф-4) и УПТФЭ («Форум») свидетельствует о существенном различии этих продуктов, полученных по различным технологиям синтеза.

Было сделано предположение о полифракционном составе УПТФЭ, включающем олигомерные (низкоплавкие) фракции с диапазоном температур плавления 333-730 К, обусловленном протеканием преимущественно процессов абляции. Анализ литературных источников, посвященных исследованиям процессов синтеза ПТФЭ и диспергирования блочных полуфабрикатов высокоэнергетическими (тепловыми, лазерными, ионизирующими) потоками, выполненных проф. Толстопятовым Е.М., проф. Красовским А.М., проф. Рогачевым А.В., проф. Бузником В.М. [12-14], и проведенные исследования особенностей состава и структуры УПТФЭ позволили предложить модельную композиционную систему, состоящую из набора олигомерных фракций и наноразмерных полимерных частиц с различным габитусом – вискерным, пластинчатым, сферическим. Для подтверждения адекватности предложенной модели исследованы процессы передеформирования и знакопеременного переноса ротапринтного покрытия из УПТФЭ при относительном осевом перемещении субстратов из инертных материалов (силикатного стекла). Экспериментальным подтверждением наличия у частиц УПТФЭ олигомерной составляющей являются данные АСМ (рисунок 2), которые свидетельствуют о изменении морфологии поверхностного слоя ротапринтного покрытия толщиной 3-5 мкм на стеклянной подложке в результате сублимации олигомерных компонентов с температурой плавления 333-473 К.

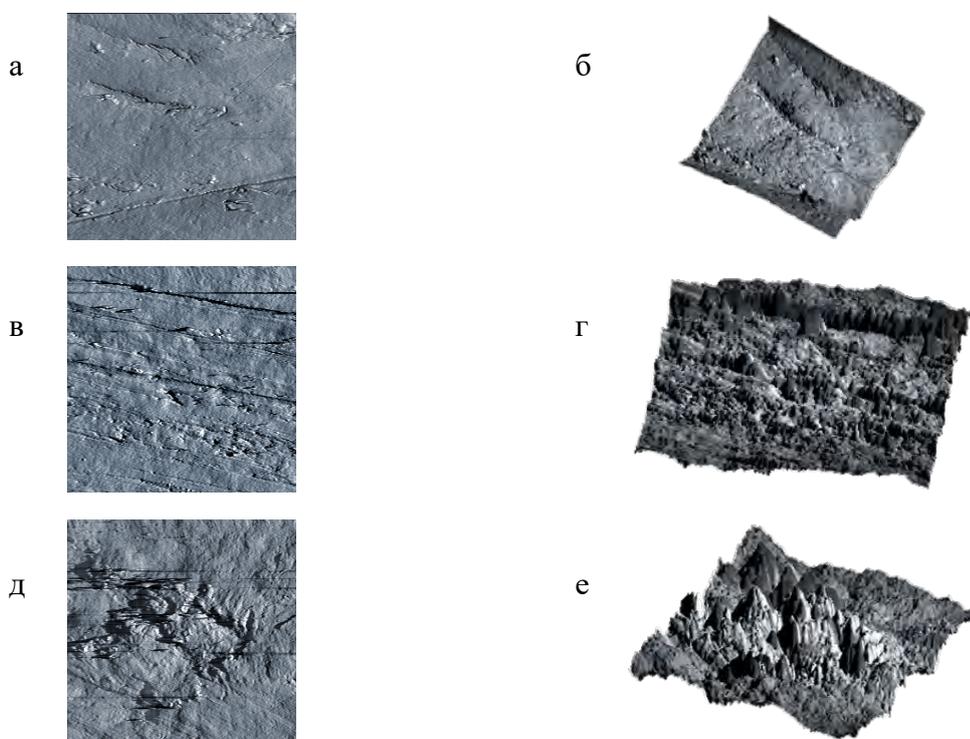


Рисунок 2. – Характерная морфология (а, в, д) и трехмерное изображение (б, г, е) поверхности слоя УПТФЭ на стеклянной подложке исходных (а, б) и после экспозиции при 473 К в течение 10 мин (в, г) и 30 мин (д, е). Поле сканирования 25×25 мкм

Благодаря наличию олигомерных составляющих обеспечивается закрепление частиц УПТФЭ на субстратах любого состава и с различными параметрами шероховатости и возможность образования функционального (разделительного, защитного) слоя со свойствами знакопеременного переноса. Модельные эксперименты свидетельствуют о том, что независимо от расположения элементов динамической или статической системы уже после экспозиции в течение 10-20 мин при температуре 473 К происходит формирование перенесенного слоя на субстрате, расположенном на расстоянии 5-10 мм, в результате сублимации и конденсации олигомерных фракций УПТФЭ (рисунок 3).

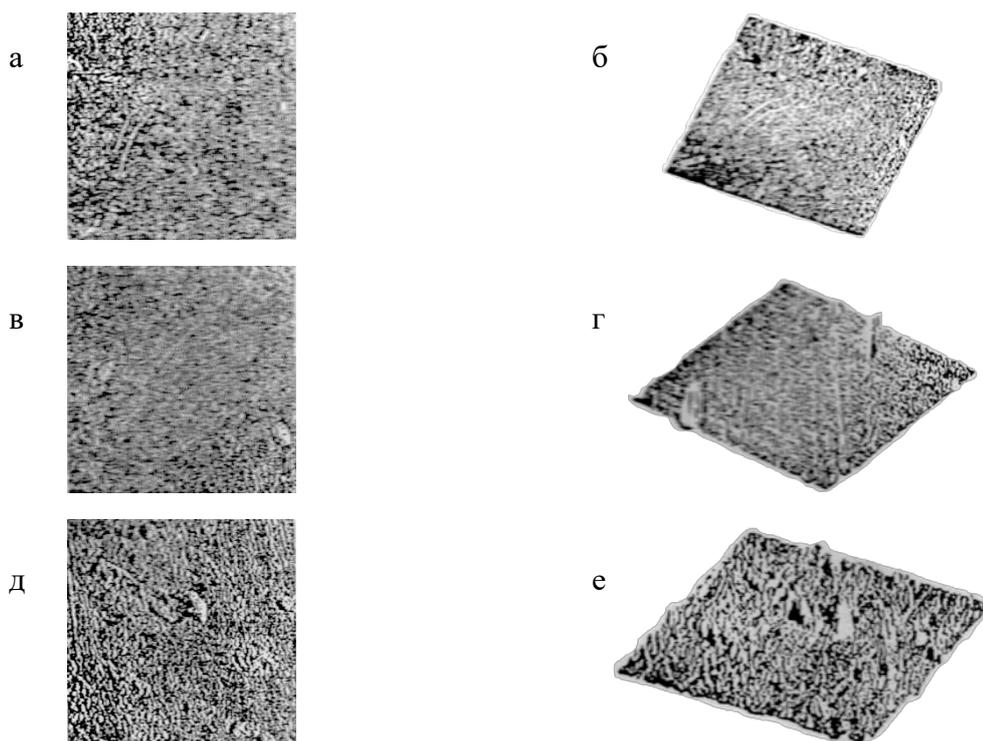


Рисунок 3. – Характерная морфология поверхности субстрата (а, в, д) и трехмерное изображение (б, г, е) исходной (а, б) и после экспозиции при 473 К в течение 10 мин при горизонтальном (д, е) и вертикальном (в, г) расположении подложек на расстоянии 5 мм. Поле сканирования 25×25 мкм

Проведенные модельные эксперименты позволили разработать методы модифицирования рабочих поверхностей элементов металлополимерных систем для придания им заданных функциональных характеристик.

Наличие в составе продуктов УПТФЭ олигомерных составляющих обеспечивает эффект пластифицирования поверхностных слоев дисперсных частиц промышленных марок ПТФЭ (Ф-4, Ф-4М). При обработке таких частиц продуктами сублимации УПТФЭ при температурах 473-573 К в течение 0,1-0,5 ч или при их смешивании с УПТФЭ в соотношении 1÷0,001–1,0 в условиях механохимического активирования формируются благоприятные условия для повышения совместимости компонентов и монолитизации заготовки при температуре 623-643 К с образованием малодефектной структуры. Вследствие наличия в модификаторе олигомерной и полимерной составляющей обеспечивается эффект увеличения в 1,1-1,2 раза параметров прочности и в 1,3-1,5 раза параметра износостойкости изделий из политетрафторэтилена промышленных марок Ф-4

и Ф-4М. На разработанные способы модифицирования дисперсных частиц ПТФЭ направлены заявки для получения патентов РБ на изобретение.

Проведенные системные исследования особенности состава, строения и морфологии дисперсных частиц УПТФЭ позволили подтвердить адекватность модели их строения, основанной на сочетании олигомерных и полимерных фракций, образовавшихся в результате сублимации и конденсации продуктов высокоэнергетической обработки.

Разработанные представления о структуре УПТФЭ позволили использовать этот комплексный модификатор для получения смесевых композитов и функциональных покрытий.

В марочном ассортименте функциональных (конструкционных и триботехнических) материалов на основе термопластичных матриц значительная доля принадлежит смесям [1-20]. При этом в зависимости от особенностей эксплуатации изделия могут быть реализованы различные типы структуры: гетерофазной с выраженным разделением матричного и легирующего компонентов, гомогенной однофазной при их повышенной термодинамической совместимости, гетерофазной с хемосорбционным взаимодействием на границе раздела, гетерофазной с граничным слоем на основе компактизирующего компонента. Тип структуры материала, обеспечивающий оптимальное сочетание параметров деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических и др. характеристик изделий в определенных условиях практического применения, в значительной мере определяет технологию совмещения матричного и легирующего компонентов и их соотношение для формирования совокупных потребительских характеристик.

Учитывая разнообразие функционального назначения и конструктивного исполнения компонентов технологического оборудования, запорной и регулирующей арматуры и автокомпонентов, были рассмотрены особенности совмещения компонентов с различным потенциалом к межфазному взаимодействию: смеси алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 66/6, ПА 11, ПА 12), смеси полиамидов с полиэфирами (ПЭТФ, ПБТФ), смеси полиолефинов первичных и регенерированных с термоэластопластами (ТЭП) и фторсодержащими соединениями (УПТФЭ).

При термомеханическом совмещении полиэфиров (ПЭТФ и ПБТФ) и полиамидов в материальном цилиндре литьевой машины образуются гетерофазные структуры с выраженным разделением фаз вследствие различия молекулярного строения, реологических и теплофизических характеристик использованных компонентов. Исследования сколов модельных образцов, охлажденных в жидком азоте (75 К), методами АСМ и РЭМ свидетельствуют о наличии общих закономерностей формирования структуры композитов, характерных для термодинамически несовместимых полимеров, рассмотренных в исследованиях, выполненных проф. Струком В.А. и сотрудниками, доц. Мануленко А.Ф., проф. Песецким С.С. и сотрудниками [1-3]. При относительно небольшом содержании каждого компонента в матричном связующем (0,5-10 мас. %) возможно формирование гетерогенной структуры с достаточной стабильностью параметров деформационно-прочностных характеристик. Учитывая распространенность этого вида крупнотоннажных термопластов и наличие значительных количеств регенерированных продуктов, существенный интерес представляла возможность использования совмещенного композита в качестве матрицы для получения конструкционных и триботехнических материалов. Установлено, что введение в состав композита ПЭТФ (ПБТФ) 5-10 мас. % ПА 6 дисперсных частиц слоистых силикатов (слюды, талька) в количестве 5-20 мас. % способствует увеличению в 1,3-1,5 раза износостойкости и в 1,16-2,4 раза адгезионной прочности покрытий. Эффект модифицирования проявляется как в смесях первичных, так и регенерированных компонентов, что повышает эффективность ис-

пользования смесевых композитов к качеству конструкционных и триботехнических изделий [11].

Исследованы особенности структуры и эксплуатационных характеристик смесевых композитов на основе компонентов с повышенной термодинамической совместимостью – алифатических полиамидов и полиолефинов. Смесевые материалы на основе полиамидов ПА 6, ПА 6.6, ПА 66/6, ПА 12 получали совмещением расплавов в двухшнековом смесителе экструзионной установки МРС 67/2 («Компекс») с использованием гранулированных компонентов в состоянии промышленной поставки. Отношение длины шнека к диаметру $L/D = 4/0,16 = 25$. Режимы совмещения выбирали в зависимости от технологических параметров матричного и модифицирующего компонента. В качестве технологических добавок использовали Irganox 1010 и стеариновую кислоту $C_{17}H_{35}COOH$ при содержании 1-5 мас. %.

Базовые компоненты полиамид – полиамидных смесей имеют близкое строение молекулярной цепи с различной длиной сегментов, примыкающих к амидной группе. При этом параметры деформационно-прочностных (σ_s , σ_c , σ_m), теплофизических ($T_{пл}$) и реологических характеристик (η) различных марок существенно отличаются. Указанное обстоятельство позволяет, изменяя соотношение компонентов, оптимизировать структуру композита в соответствии с технологическими требованиями (таблица 1). Введение в состав базового полиамида (ПА 6, ПА 6.6, ПА 66/6) модификаторов (ПА 12, ПА 6) позволяет оптимально реализовать преимущества каждого из компонентов смесевых материалов при достижении технически значимого эффекта увеличения параметров E_f , σ_{fm} , σ_m .

Таблица 1. – Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе алифатических полиамидов

Материал	E_f , МПа	σ_{fm} , МПа	ε_{fm} , %	σ_m , МПа	ε_m , %
ПА 6-210/310	2318,1	89,18	6,1	65,19	3,8
ПА 6,6-Л	2647,1	107,3	5,8	77,70	4,0
ПА 66/6	2207,6	95,97	6,2	69,36	4,3
ПА 12	1226,1	51,90	6,1	56,35	250
ПА 6,6 (94 %) + ПА 6 (5 %) + ПА 12 (1 %)	2571,1	99,89	4,7	77,71	4,3
ПА 6,6 (90 %) + ПА 6 (5 %) + ПА 12 (5 %)	2525,2	100,6	5,2	75,58	5,9
ПА 6,6 (84,5 %) + ПА 6 (10 %) + ПА 12 (5 %) + + С1 (0,5 %)	2984,7	114,7	6,7	78,84	3,9
ПА 6,6 (84,5 %) + ПА 6 (10 %) + ПА 12 (5 %) + + УНТ (0,5 %)	2797,8	109,7	6,1	54,19	2,1
ПА 6,6 (84,5 %) + ПА 6 (10 %) + ПА 12 (5 %) + + шихта (0,5 %)	2850,5	115,1	6,8	77,80	3,8

Важной особенностью смесевых композитов на основе алифатических полиамидов является высокая гомогенность структуры, обусловленная формированием межфазных слоев из макромолекул близкого строения (рисунок 4). В отличие от смесей компонентов с выраженным различием молекулярного строения компонентов (ПА 6 – ПЭТФ, ПА 6 – ПБТФ, ПА 6 – СВД) смеси алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 66/6, ПА 12) не имеют выраженной границы раздела фаз. При введении в состав композита наноразмерных частиц (шихта, УНТ, С-1) повышаются значения параметров E_f (от 2207,6-2647,1 МПа до 2797,8-2984,7 МПа), σ_{fm} (от 51,9-107,3 МПа до 109,7-

115,1 МПа), σ_m (от 56,35-77,70 МПа до 77,80-78,84 МПа). Термомеханически совмещенные полиамиды целесообразно использовать в качестве связующих конструкционных и триботехнических материалов.

При совмещении полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД, ТЭП) формируются композиты с высокой фазовой однородностью и регулируемыми реологическими характеристиками. Достижимый эффект проявляется и при использовании регенерированных компонентов, что позволяет получать полноценные материалы для изделий различного функционального назначения.



Рисунок 4. – Характерная морфология композита сравнения ПА 6 – СФД (а) и композита ПА 6.6 + ПА 6 (б). Сколы в азоте. Содержание компонентов 50:50 мас. %

Полимер-олигомерное строение продуктов ТГДС политетрафторэтилена позволяет использовать их в различных видах композиционных материалов и технологиях их переработки и применения.

Исследованы триботехнические и защитные характеристики ротапринтных покрытий толщиной 5-10 мкм, сформированных на компонентах металлополимерных систем. Установлено, что наличие олигомерной составляющей в композиционном покрытии из УПТФЭ обеспечивает необходимый уровень адгезии и способность к передеформированию,

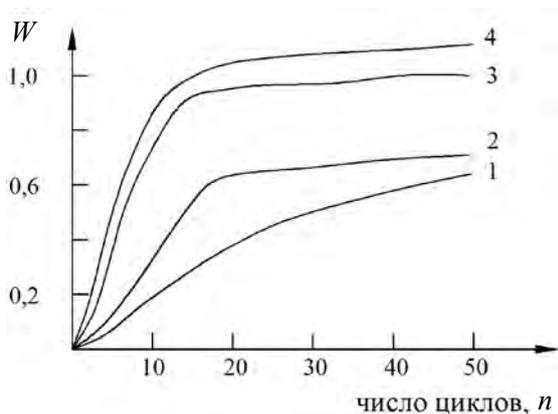


Рисунок 5. – Кинетика переноса при трении графитового образца по контртелу из ст45 исходной (1), фосфатированной (2), с подслоем из олигомера Ф-1 (3), с ротапринтным подслоем УПТФЭ (4)

уменьшающие интенсивность коррозионно-механического изнашивания. В зоне трения формируется разделительный слой с площадью W со свойствами знакопеременного переноса, который по эффективности противоизносного действия превосходит действие тонких пленок фторсодержащих олигомеров «Фолеокс», слоев фосфатов металлов, нитрида титана (рисунок 5). Образующиеся продукты изнашивания закрепляются благодаря олигомерной составляющей в зоне трения (рисунок 6), реализуя принцип функционирования малоизнашивающейся металлополимерной системы (МИМС), предложенный в работах проф. Струка В.А. и сотрудников.

Эффективность противоизносного действия ротапринтных покрытий УПТФЭ повышается при модифицировании композиции 0,01-0,1 мас. % наноразмерных частиц углеродсодержащих компонентов (С-1, УНТ, шихта), которые выполняют функцию

армирующей добавки. Полимер-олигомерные композиты на основе УПТФЭ эффективны при применении в качестве ротапринтных покрытий шлицевых соединений карданных валов (ОАО «Белкард») и уплотнительных узлов запорной и регулирующей арматуры (ПУП «Цветлит»).

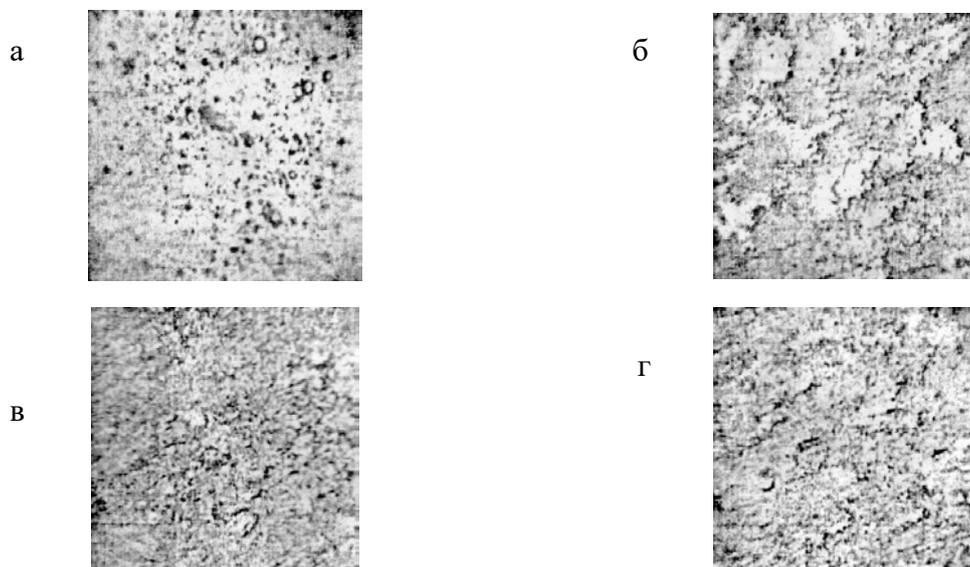


Рисунок 6. – Морфология поверхностного слоя контртела из ст45: исходного (а), с ротапринтным подслоем УПТФЭ (б), после 5 (в) и 20 (г) циклов фрикционного взаимодействия. $\times 300$

Разработаны составы композиционных материалов на основе смесей алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 66, ПА 12) и (ПА 6.6, ПА 11), которые использованы в качестве конструкционных и триботехнических материалов для узлов трения автокомпонентов и технологического оборудования. Легирование базовых термопластов (ПА 6.6, ПА 6) термодинамически совместимыми компонентами (ПА 66/6, ПА 12) в сочетании с наноразмерными частицами обеспечивает повышение параметров деформационно-прочностных характеристик (таблица 1). При этом, варьируя содержанием модифицирующего полиамида, удастся управлять параметрами реологических характеристик и гидрофобности. Важным эксплуатационным параметром разработанных составов конструкционных материалов на основе смесей полиамидов является повышенная стойкость к воздействию термоокислительных сред, обусловленная действием наноразмерных частиц в качестве нецепного стабилизатора. После экспозиции при 423 К в течение 150-300 часов потери прочности σ_p композитов не превышали 25-30 % при 50-70 % потерях, характерных для базовых (ПА 6, ПА 6.6) и совмещенных матриц (ПА 6.6, ПА 6, ПА 12).

Для формирования триботехнических покрытий наиболее эффективны композиты на основе ПА 6, модифицированного ПА 11. При оптимальном сочетании компонентов ПА 6/ПА 11 (60:40 – 50:50) достигается увеличение в 1,15-1,9 раз параметра износостойкости покрытий (рисунок 7), сформированных методом псевдооживленного слоя из порошкообразных компонентов с размерами частиц до 150 мкм при низких значениях коэффициента трения в диапазоне 0,20-0,25 при исходных значениях 0,40-0,42.

Совместимость матричного ПА 6 и легирующего ПА 11 компонентов приводит к формированию гетерофазной структуры, реализующей синергический эффект, проявляющийся в сочетании необходимой адгезионной прочности на подложках из углероди-

стых и легированных сталей (ст45, ХГНТР) (бал адгезии 0-1), высоких защитных характеристик и повышенной гидрофобности, характеризуемой значением коэффициента растекания (таблица 2).

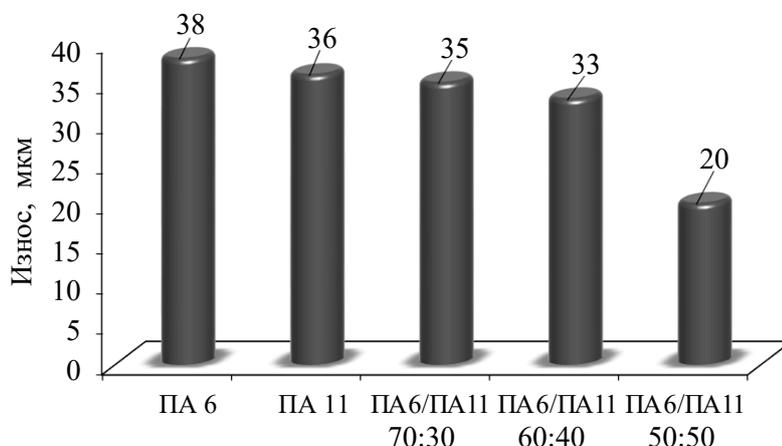


Рисунок 7. – Величина износа покрытий из полиамидов

Таблица 2. – Значения показателей фактора растекания жидкофазной среды

Материал подложки	θ_1 , град.	θ_2 , град.	α_1	α_2
ПА 6	52	62	0,72	0,85
ПА 11	46	48	0,64	0,66
ПА 6 / ПА 11 (50:50)	54	50	0,75	0,69
ПА 6 / ПА 11 (60:40)	55	49	0,76	0,68
ПА 6 / ПА 11 (70:30)	59	49	0,81	0,68

Примечание: α_1 – фактор растекания капли дистиллированной воды;
 α_2 – фактор растекания капли глицерина

Разработанные составы композиционных материалов на основе отечественного полиамида ПА 6, ПА 6.6 (ОАО «Гродно Азот») являются полноценной альтернативой применяемым покрытиям из импортного аналога ПА 11 («Rilsan») и имеют существенно более низкую стоимость при использовании отечественного технологического оборудования для получения порошкообразных полуфабрикатов (установка криогенного измельчения) и формирования покрытий (установка ГНУ ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси) [20].

Разработанные составы композиционных материалов на основе регенерированных полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД), производимых ОАО «Белвтрополимер», по параметрам деформационно-прочностных характеристик не уступают первичным материалам (ПП «Ставролен») при более высокой ударной вязкости и морозостойкости (243-233 К). Разработанные составы композитов на основе термомеханически совмещенных полиолефинов использованы для изготовления методом экструзии трубных заготовок для обечаек металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров, используемых на ОАО «Беларуськалий», ОАО «Гродно Азот». Совместно с ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» разработана нормативная и техническая документация, регламентирующая процессы изготовления и применения металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров. Осуществлен выпуск опытной партии металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров с комплек-

тующими элементами (корпусом подшипника, обечайкой) из композитов на основе совмещенных полиамидов (ПА 6, ПА 6.6) и полиолефинов (ПП, ПЭНД). Для повышения ресурса подшипникового узла роликоопоры использована пластичная смазка на основе пластичных материалов Литол-24, ИТМОЛ, модифицированная сочетанием УПТФЭ и нанодисперсных углеродных частиц. Испытания опытной партии металлополимерных роликоопор в технологическом оборудовании, применяемом на ОАО «Беларуськалий», показали эффективность их применения взамен металлических роликоопор из трубного проката вследствие повышенной стойкости к воздействию коррозионно-активных сред и коррозионно-механическому изнашиванию.

Заключение

Проведены исследования особенностей структуры и эксплуатационных характеристик композиционных материалов на основе смесей термопластичных полимерных и олигомерных компонентов, полученных различными технологиями совмещения.

Экспериментально установлены механизмы межфазных взаимодействий в смесевых композитах алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 66/6, ПА 12, ПА 11), полиолефинов (ПП, ПЭВД, ПЭНД), модифицированных допинговыми добавками (0,001-0,5 мас. %) углерод-, кремний- и металлсодержащих частиц (С-1, УДА, УДАГ, шихта, Си, глины), состоящие в образовании адсорбционных межмолекулярных связей, которые приводят к увеличению в 1,1-1,2 раза параметров деформационно-прочностных, в 2,0-3,0 раза адгезионных и в 1,5-2,0 раза триботехнических характеристик по сравнению с матричными полимерами.

Исследованы особенности строения дисперсных продуктов термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена, представляющих сочетание олигомерных и полимерных фракций, способных к передеформированию под действием напряжений сдвига с образованием ротапринтных композиционных покрытий, снижающих коррозионно-механический износ металлополимерных систем.

Установлен эффект увеличения стойкости смесевых композитов к термоокислительной деструкции при температуре окружающей среды 373-423 К при их модифицировании наноразмерными частицами углеродсодержащих (графит коллоидный С-1, шихта, УДАГ), кремнийсодержащих (глины), металлсодержащих (Си) соединений при содержании 0,001-0,5 мас. % вследствие проявления ими свойств физического компатибилизатора и уменьшения активности полимерных макромолекул к средству кислорода.

Разработаны составы конструкционных, триботехнических материалов на основе термомеханически совмещенных полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12) и регенерированных полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) с повышенными в 1,1-3,0 раза параметрами служебных характеристик для изготовления корпусных, триботехнических элементов и покрытий ленточных конвейеров для химической и горнодобывающей промышленности, автомобильных компонентов, запорной и регулирующей арматуры.

Список цитированных источников

1. Струк, В.А. Трибохимическая концепция создания антифрикционных материалов на основе многотоннажно выпускаемых полимерных связующих: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В.А. Струк. – Гомель, 1988. – 240 л.

2. **Струк, В.А.** Структура композиционных материалов на основе механических смесей термопластов / В.А. Струк, А.А. Война // Пластические массы. – 1985. – № 12. – С. 37-38.
3. **Гольдаде, В.А.** Ингибиторы изнашивания металлополимерных систем / В.А. Гольдаде, В.А. Струк, С.С. Песецкий. – М.: Химия, 1993. – 240 с.
4. Полимерные смеси: в 2 т.; пер. с англ. / Д. Пол [и др.]; под ред. Д. Пола, С. Ньюмена. – Т. 1. – М.: Мир, 1981. – 550 с.
5. Полимерные смеси: в 2 т.; пер. с англ. / Д. Томас [и др.]; под ред. Д. Пола, С. Ньюмена. – Т. 2. – М.: Мир, 1981. – 553 с.
6. **Сперлинг, Л.** Взаимопроникающие полимерные сетки и аналогичные материалы: пер. с англ. / Л. Сперлинг. – М.: Мир, 1984. – 327 с.
7. О влиянии небольших концентраций полимерных добавок на вязко-упругие свойства композиционных материалов / Ю.С. Липатов [и др.] // Доклады АН УССР. – 1976. – Сер. В, № 8. – С. 716-717.
8. Реологические свойства смесей кристаллизующихся полиамидов / В.Ф. Шуйский [и др.] // Коллоидный журнал. – 1976. – Т. 38, № 5. – С. 949.
9. К вопросу о совмещении термопластов и термоэластопластов / В.А. Струк [и др.] // Доклады АН БССР. – 1986. – Т. 30. – С. 987-990.
10. Полипропилен, модифицированный термоэластопластом / М.С. Акутин [и др.] // Пластические массы. – 1970. – № 2. – С. 47-48.
11. **Антонов, А.С.** Влияние наполнителей на триботехнические свойства смесевых композиций на основе термопластов / А.С. Антонов, Г.С. Кондрашова, А.А. Скаскевич // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2013. – № 4. – С. 36-42.
12. Наноконпозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения: монография / С.В. Авдейчик [и др.]. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 400 с.
13. 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.
14. Введение в физику наноконпозиционных машиностроительных материалов: монография / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 438 с.
15. Металлополимерные наноконпозиты: особенности структуры, технология, применение: монография / А.А. Рыскулов [и др.]; под науч. ред. В.А. Струка, В.А. Лиопо. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 334 с.
16. **Кулезнев, В.Н.** Смесии и сплавы полимеров / В.Н. Кулезнев. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 216 с.
17. **Прут, Э.В.** Химическая модификация и смешение полимеров в экструдере-реакторе / Э.В. Прут, А.Н. Зеленецкий // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, № 1. – С. 72-87.
18. **Кербер, М.Л.** Модифицирование полимерных материалов в ходе их переработки / М.Л. Кербер // Пластические массы. – 1971. – № 5. – С. 59-66.
19. Металлополимерные наноконпозиты (получение, свойства, применение) / В.М. Бузник [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 260 с.
20. **Антонов, А.С.** Разработка составов и технологий смесевых композиций на основе алифатических полиамидов для функциональных покрытий трибоузлов / А.С. Антонов, А.С. Воронцов, М.А. Копть // Научные стремления-2015: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. молодежной конф.: в 2 ч., Минск, 25-27 марта 2015 г. /

ООО «Лаборатория интеллекта» и Центр молодежных инноваций; редкол.: Ю.М. Сафонова [и др.]. – Минск: «Энциклопедикс», 2015. – Ч. 2. – С. 104-107.

Перечень условных обозначений

- σ_b – предел прочности при разрушении, МПа;
 σ_c – предел текучести, МПа;
 σ_m – теоретическая прочность, МПа;
 $T_{пл}$ – температура плавления, °С;
 η – вязкость расплава полимера, Па·с;
 E_f – модуль упругости при изгибе (модуль Юнга), МПа;
 σ_{fm} – предел прочности при изгибе, МПа;
 σ_m – предел прочности при растяжении, МПа;
 ε_{fm} – относительное удлинение при изгибе, %;
 ε_m – относительное удлинение при растяжении, %;
 W – площадь перенесенного слоя, мм²;
 σ_p – потери прочности, %;
 θ_1 – краевой угол смачивания твердой поверхности полярной жидкостью (дистиллированной водой), град.;
 θ_2 – краевой угол смачивания твердой поверхности неполярной жидкостью (глицерином), град.;
 α_1 – фактор растекания капли дистиллированной воды;
 α_2 – фактор растекания капли глицерина.

Antonov A.S., Ishchenko M.V., Burtsev A.N., Struck V.A.

Composite materials based on thermoplastic blends

The parameters of the structure, stress-strain, adhesion and tribotechnical characteristics of composite materials based on thermoplastic blends obtained by various technologies of components compounding have been investigated. The formulations of structural and tribotechnical materials for the manufacture of parts and coatings for the constructions of technological equipment, vehicle components and tooling have been developed.

Поступила в редакцию 10.06.2016 г.

Уважаемый рецензент, при написании рецензии просьба руководствоваться следующими рекомендациями:

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

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции 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 горно-шахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогачительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогачительных предприятий;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительных технологий обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструкционных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- разработка автоматизированных систем управления горно-шахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:

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: ontiipr@tut.by

<http://www.sipr.by>