

ISSN 1728-3841

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2016 №2

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ



2016 № 2

ГОРНАЯ МЕХАНИКА
И МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 2 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
Заяц Ирина Михайловна

Редакционная коллегия:

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

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



Адрес редакции:

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

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

Оника С.Г., Гец А.К., Халявкин Ф.Г., Реберт Б.С. Технологические схемы разработки обводненных песчаных, гравийно-песчаных и песчано-гравийных месторождений	5
Липницкий Н.А. Корректировка расчетной величины давления на бетонную крепь при проходке ствола способом замораживания	9
Оника С.Г., Гец А.К., Халявкин Ф.Г., Реберт Б.С. Моделирование сейсмического действия массовых взрывов на карьере «Микашевичи»	15
Березовский Н.И., Лесун Б.В. Рациональное использование местных видов топлива и вторичных энергетических ресурсов	21
Березовский Н.И., Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Костюкевич И.Г. Резерв повышения эффективности использования ресурсов при производстве пористого керамического кирпича	30
Барбиков Д.В., Кацемба С.Н., Курлович Д.М. Петриковское месторождение калийных солей (Северный участок) и его гидрогеологическая изученность	38
Березовский Н.И., Лесун Б.В. Усреднение сырьевой смеси при обогащении местных видов топлива	48

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Иванов В.П. Обкатка редукторов горно-шахтных машин	55
Ищенко М.В., Кондратчик Н.Ю. Изнашивание роликов валкового пресса в дисперсной массе хлористого калия	60
Павлечко В.Н., Казаченко Г.В. Давление осевого нагнетателя с изогнутыми лопастями	66
Таболич А.В., Бондаренко С.Н. Конструкционные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц	71
Казаченко Г.В. Передача трением усилий со стороны барабана (шкива) на ленту конвейера (ремня). Часть 1. Моделирование взаимодействия ленты с барабаном	78

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Сорокин В.Г., Авдейчик С.В., Антонов А.С., Ищенко М.В., Струк В.А., Сазонко Г.Г. Композиционные материалы на основе термопластичных матриц и модифицированных короткоимпульсным лазерным излучением компонентов	86
--	----

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

На 1-й стр.: конвейер ленточный с разгрузочной тележкой.

На 3-й стр.: барабаны ленточного конвейера с резино-керамической футеровкой.

Свидетельство о государственной регистрации СМИ № 1000 от 12.01.2010 г.

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

Подписано в печать 06.06.2016 г.

Формат 60×84¹/₈. Бумага «Navigator», А4, 80 г/м². Заказ 1544. Усл. печ. л. 11,20. Тираж 120 экз.

Отпечатано Минским областным унитарным предприятием «Слущкая укрупненная типография»

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

ЛП № 02330/0494181 от 03.04.2009 г.

MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 2 2016

Founder of the Journal:

JSC «Soligorskiy 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: ontiiipr@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 «Soligorskiy Institute of Resource Saving Problems with Experimental Works», 2016

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Onika S.G., Gets A.K., Khalyavkin F.G., Rebert B.S. Technical plan of development of water-bearing arenaceous, sand-and-gravel deposit	5
Lipnitsky N.A. The adjustment of ratings of pressure on a concrete lining during sinking of a shaft by method of freezing	9
Onika S.G., Gets A.K., Khalyavkin F.G., Rebert B.S. Modeling of a shock effect of large-scale blasts on Mikashevichi opencast mine	15
Berezovsky N.I., Lesun B.V. Efficient use of local fuels and secondary energy resources.....	21
Berezovsky N.I., Voronova N.P., Kostukevich H.K., Kostukevich I.G. Reserve increase efficiency in resource production of porous ceramic bricks	30
Barbikov D.V., Katsemba S.N., Kurlovich D.M. Petrikov deposit of potash salt (Northern prospect) and knowledge on it hydrogeology	38
Berezovsky N.I., Lesun B.V. Homogenization of a raw mixture by domestic fuels beneficiation	48

MACHINE-BUILDING

Ivanov V.P. Running-in of gears of mining machines	55
Ishchenko M.V., Kondratchik N.Yu. Depreciation of rollers of a roll compactor in dispersive mass of potassium chloride	60
Pavlechko V.N., Kazachenko G.V. Pressure of an axial blower as a function of a blade angle relative to the fluid flow direction	66
Tabolich A.V., Bondarenko S.N. Design opportunities to improve wear resistance of accelerators of centrifugal impact mills	71
Kazachenko G.V. Friction force transmission of a drum (pulley) on a conveyor belt (belt). Part 1. Modeling of the interaction of a tape with a drum	78

MATERIALS ENGINEERING

Sarokin V.G., Avdeychik S.V., Antonov A.S., Ishchenko M.V., Struck V.A., Sazonko G.G. Composite materials based on thermoplastics and modified by short-pulse laser radiation of components	86
--	----

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.271.63(045)(476)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РАЗРАБОТКИ ОБВОДНЕННЫХ ПЕСЧАНЫХ, ГРАВИЙНО-ПЕСЧАНЫХ И ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

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

В статье представлены результаты исследований технологических схем разработки месторождений с применением драглайнов и земснарядов. Обосновано вероятное увеличение угла откоса забоя драглайна с ростом содержания гравия в полезном ископаемом. Приведены параметры технологии добычи песка земснарядами с погружными землесосами.

Введение

Значительная часть общего числа месторождений нерудных строительных материалов приходится на обводненные месторождения. Для песчаных, песчано-гравийных и гравийно-песчаных месторождений доля частично или полностью обводненных в Республике Беларусь превышает 50 %. В связи с этим на один из первых планов в науке и практике выдвигаются задачи совершенствования технологий разработки указанных месторождений в сложных гидрогеологических условиях.

Результаты исследований

Разработка обводненных песчаных и гравийно-песчаных месторождений возможна экскаваторным и гидромеханизированным способами. Разработка частично обводненных и обводненных месторождений экскаваторным способом осуществляется с применением преимущественно драглайнов и реже – обратных лопат.

Расширение области применения экскаваторов при разработке обводненных месторождений потребовало усложнения технологии по сравнению с разработкой сухих забоев. Экскаваторы-драглайны, получившие широкое применение на песчано-гравийных карьерах, допускают отработку обводненной толщи без осушения на глубину до 4-5 м, а шагающие экскаваторы при отработке карбонатных пород – на глубину до 18 м. При высоком содержании валунов эффективность применения драглайнов снижается.

Поскольку из подводного забоя извлекается пульпообразная масса, возникает необходимость промежуточного складирования горной массы, вынутой из-под воды. Чтобы снизить влажность, добытое полезное ископаемое укладывают в штабель. Продолжительность обезвоживания в штабеле зависит от содержания глинистых частиц и может достигать нескольких дней, а в некоторых случаях – даже недель. Поэтому, технологии с созданием обезвоживающего штабеля требуют увеличения ширины рабочей площадки уступа и повторной отгрузки горной массы. Из навала полезное ископаемое вынимается и отгружается преимущественно в автомобильный транспорт одноковшовыми фронтальными погрузчиками и прямыми лопатами (реже драглайнами). Выбор технологии экскаваторной разработки обводненного месторождения

и типа оборудования требует анализа, при проведении которого исследователи сталкиваются с определенными трудностями, а возможность применения поправочных коэффициентов к нормам выработки остается открытой.

Работа в обводненном забое снижает производительность добычного оборудования. Так при глубине подводного забоя до 0,5 м производительность экскаваторов с емкостью ковша до 5 м снижается на 10 %, а при глубине забоя до 4,0 м – на 23 %. При добыче полезного ископаемого из-под воды рабочие параметры экскаваторов с оборудованием драглайна используются не полностью, и забой не отрабатывается на глубину, соответствующую максимальной глубине черпания. Это связано с тем, что угол откоса обводненного забоя является менее устойчивым (с более пологим откосом), и вследствие разрыхления породы ковшом под действием воды порода вблизи прохода ковша теряет устойчивость, размывается водой и нивелирует дно подводной выработки на уровне выше глубины черпания. При разработке подводного забоя коэффициент наполнения ковша снижается до 0,5-0,7, а при выемке мелкозернистых песков – до еще меньших значений. Увеличить коэффициент наполнения ковша можно, перфорируя его стенки. ФГУП «ВНИПИИСтройсырье» разработало оригинальные конструкции ковшей различных экскаваторов, предназначенные для разработки подводного забоя. Изготовленный по заданию института ковш, вместимостью 11 м³, для экскаватора ЭШ 10/70 на карьере Гралево за цикл вынимал до 13 м³ взорванного доломита. Глубина подводного забоя достигала 18 м [1]. К сожалению, в практике горных работ инновационные конструкции ковшей широкого применения не получили.

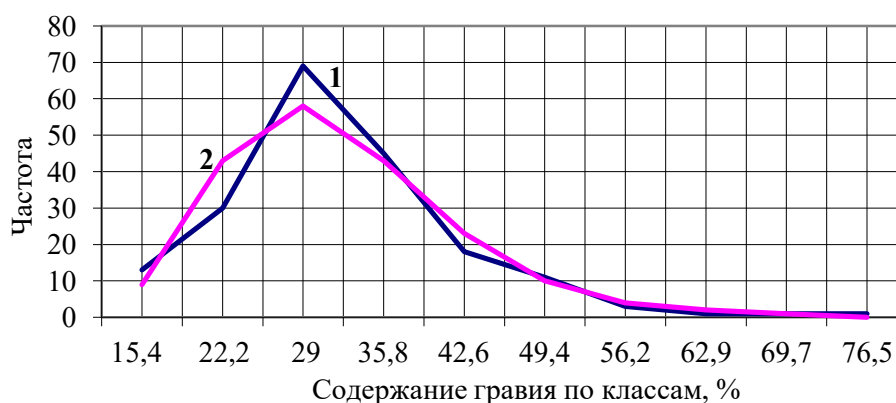
Случайные вариации содержания гравия в массиве вызывают изменения угла откоса подводного забоя. В этой связи интерес представляет рассмотрение закономерностей изменения содержания фракции гравия в массиве. Увеличение содержания гравия в породе благоприятно сказывается на устойчивости откоса, что позволяет увеличить глубину выемки. С увеличением содержания гравия угол откоса подводного забоя возрастает.

Распределение фракции гравия +5 мм в массиве не противоречит логарифмически-нормальному распределению. Функцию плотности вероятности для содержания гравия можно представить уравнением (рисунок 1)

$$y = \eta \cdot (\sqrt{2\pi\beta})^{-1} \cdot e^{\left[-\frac{1}{2}\eta^2\left(\frac{\gamma^*}{\eta} + \ln\beta\right)\right]},$$

где η , γ^* – параметры формы теоретического распределения.

β – содержание гравия (+5 мм) в массиве, %.



1 – эмпирическое распределение; 2 – логарифмически-нормальное распределение

Рисунок 1. – Сравнение эмпирического и теоретического распределения фракции гравия +5 мм

Теоретическое распределение гравия в массиве хорошо согласуется с эмпирическими результатами, что наглядно иллюстрируется представленными графиками.

С учетом рассмотренных закономерностей соотношение для определения наиболее вероятного значения угла откоса подводного забоя драглайна имеет вид:

$$\alpha_{\text{пз}} = 0,32 \exp(-\gamma^*/\eta) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\eta^2}\right) + 4,$$

где выражение $\exp(-\gamma^*/\eta) \cdot \exp\left(-\frac{1}{\eta^2}\right)$ представляет собой наиболее вероятное значение содержания фракции гравия в массиве.

Разработка месторождений альтернативным гидромеханизированным способом обычно выполняется с помощью земснарядов. Указанное оборудование является господствующим при разработке частично или полностью обводненных месторождений. Область их применения ограничивается глубиной отработки залежи до 10-15 м и содержанием каменистых включений (гравия и валунов) до 40 %. Технология разработки месторождений предусматривает предварительное создание карт намыва, на которые сбрасывается пульпа.

Одним из направлений совершенствования технологии разработки обводненных месторождений является внедрение в производство земснарядов на базе погружных грунтовых насосов. В республике Беларусь получила применение конструкция земснаряда компании «Augum Pumpen GmbH» (Германия).

Общий вид земснаряда с погружным землесосом представлен на рисунке 2.

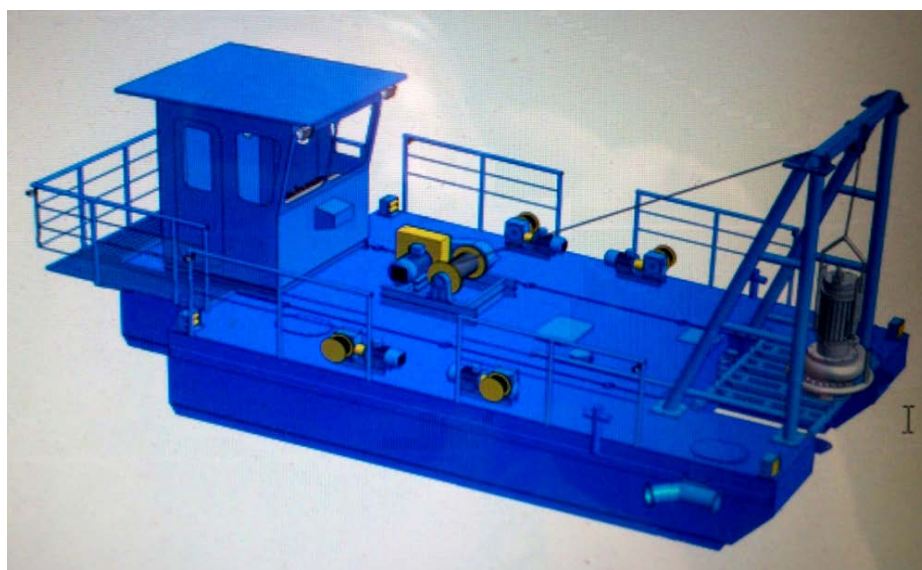


Рисунок 2. – Общий вид земснаряда ADST-300 с погружным землесосом

Технология разработки с применением земснарядов нового поколения предусмотрена, в частности, в проекте корректировки горных работ на месторождении силикатных песков «Околоты», выполненного нами на основании технического задания ОАО «Березовский комбинат силикатных изделий» [2].

В принятом земснаряде серии «ADST» для добычи силикатного песка на месторождении силикатных песков «Околоты» заложена новая концепция выемки грунта, специально разработанная для смесей высокой вязкости и с высоким содержанием

твердых частиц. Плотность перекачиваемой пульпы может достигать $1,4 \text{ кг/дм}^3$. В конструкции инновационного земснаряда применен электрический погружной насос со встроенным электродвигателем и механическим рыхлителем – мешалкой. Дополнительно на насос монтируется гидроразмывочное кольцо с форсунками, которое посредством консольного насоса, устанавливаемого на плавбазе земснаряда, обеспечивает гидравлическое разрыхление грунта в зоне работы землесосного снаряда и повышенную плотность пульпы для перекачивания. При производительности по пульпе $360 \text{ м}^3/\text{ч}$ средняя производительность по твердому веществу составляет $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, что нельзя достичь применением классических землесосов с их трюмной или надводной установкой, для которых удельный расход воды для I категории грунта достигает 7 м^3 воды на добычу 1 м^3 сухого песка.

Заключение

Для обводненных песчаных, гравийно-песчаных и песчано-гравийных месторождений в Беларуси доминируют технологии с добычей полезного ископаемого из-под воды драглайнами с промежуточным складированием в штабель и последующей отгрузкой экскаваторами или погрузчиками в средства автомобильного транспорта, а также технологии гидромеханизированной разработки с применением земснарядов. Установлено вероятное изменение угла откоса забоя драглайна с ростом содержания гравия в массиве. Применение инновационных технологий добычи песка земснарядами с погружными насосами в 2 раза повышает их производительность в сравнении с земснарядами трюмной и надводной установкой землесосов.

Список цитированных источников

1. Буткевич, Г.Р. Проблемы разработки обводненных месторождений / Г.Р. Буткевич // Строительные материалы. – 2003. – № 7. – С. 11.
2. Корректировка горных работ карьера песка на месторождении «Околоты». Рабочий проект. Том 1. Пояснительная записка ООО «БелНедраГаз». – Минск, 2015. – 45 с.

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

Technical plan of development of water-bearing arenaceous, sand-and-gravel deposit

The article presents the results of research of technical plan of deposits development with the application of draglines and hydraulic excavators. A probable increase of a slope angle of a dragline face with the increase of a gravel content in minerals has been proved. Characteristics of the process of sand extraction by applying hydraulic excavators equipped with immersed dredges have been given.

Поступила в редакцию 05.04.2016 г.

УДК 622.253.3:622.283.4

КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ НА БЕТОННУЮ КРЕПЬ ПРИ ПРОХОДКЕ СТВОЛА СПОСОБОМ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

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

В статье приведена методика корректировки рекомендуемого множителя (коэффициента разгрузки), которая позволяет перейти от пространственного характера деформирования пород вблизи забоя выработки к плоской расчетной схеме, учитывающей применение специального способа проходки – замораживания горных пород.

Введение

Искусственное замораживание горных пород для строительства подземных сооружений было впервые применено в Германии в 1863 г. при строительстве шахты «Арчибалд», где при проходке ствола на глубине 34 метра появился пływун. На сегодняшний день наибольшая глубина замораживания пород (935 м) была достигнута при проходке ствола «Болби» (Великобритания) [1]. Развитие этого специального способа проходки обуславливается его надежностью и подтверждается применением при строительстве «под ключ» более чем 200 стволов [2] на шахтах угольной, горнорудной и горно-химической промышленности специалистами треста «Шахтоспецстрой» (г. Москва) в течение 60 лет своей производственной деятельности.

Применение данного специального способа проходки при строительстве капитальных горных выработок обусловлено опытом использования в специальных расчетах крепи корректирующего коэффициента, который позволяет перейти от трехмерного деформирования пород на забое выработки к плоской расчетной схеме крепи и учитывает предшествующие возведению крепи неупругие деформации пород.

Использование этого множителя отражает основные принципы, заложенные в прикладную дисциплину – механику подземных сооружений, разработкой которой на постсоветском пространстве занимается профессорско-преподавательский состав Тульского государственного университета (г. Тула).

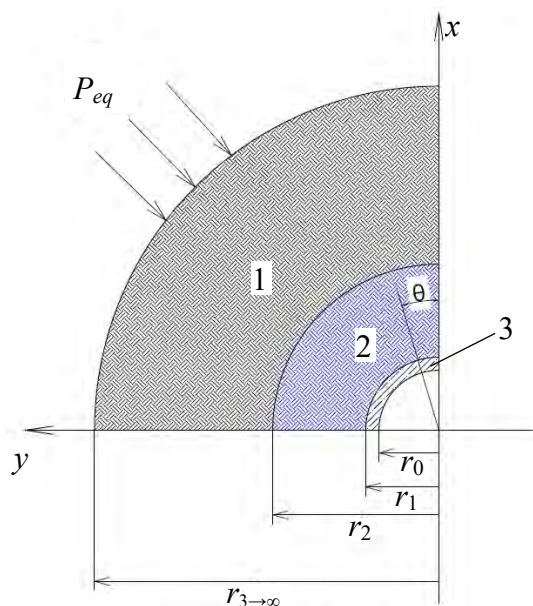
Основная часть

В механике подземных сооружений крепь горных выработок и окружающий массив представлены как находящиеся в контакте элементы единой деформируемой системы «крепь - массив», взаимодействующие друг с другом под влиянием внешних нагрузок и воздействий.

Такой принцип взаимодействия позволяет учитывать роль массива пород в обеспечении прочности и устойчивости подземных сооружений и максимально использовать собственную несущую способность массива, соответственно облегчая и удешевляя подземные сооружения [3].

Расчетная схема монолитной бетонной крепи вертикального шахтного ствола при применении искусственного замораживания представляет собой трехслойное кольцо, внешний бесконечный слой которого моделирует массив пород, нагруженный на бесконечности эквивалентными напряжениями P_{eq} (рисунок).

В качестве исходных данных приняты физико-механические свойства слоя песчано-гравийных отложений, находящихся на глубине 112,5 м, с гидростатическим давле-



1 – порода в естественном состоянии; 2 – порода в замороженном состоянии; 3 – бетонная крепь;
 r_0 – радиус ствола в свету; r_1 – радиус ствола вчерне;
 r_2 – радиус зоны замороженных пород;
 $r_{3 \rightarrow \infty}$ – породный массив в естественном состоянии
 Рисунок. – Расчетная схема монолитной бетонной крепи вертикального шахтного ствола при применении искусственного замораживания и устройства передовой бетонной крепи

нием 0,72 МПа и характеристиками: $E_0 = 7000$ МПа (модуль упругости пород в естественном состоянии), $\nu_0 = 0,35$ (коэффициент Пуассона пород в естественном состоянии). Удельный вес пород с учетом взвешивающего действия воды $\gamma = 0,01946$ МН/м³.

Радиус ствола вчерне согласно проекту $r_1 = 4,75$ м; радиус ствола в свету $r_0 = 4,25$ м. Материал крепи – монолитный бетон марки В30 с характеристиками $E_1 = 14824$ МПа (расчетный модуль упругости бетона в возрасте 7-ми суток), $\nu_1 = 0,2$ (коэффициент Пуассона бетона), $R_b = 9,9$ МПа (предел прочности бетона при сжатии), толщина крепи $t = r_1 - r_0 = 50$ см.

Характеристики бетона приняты без учета добавок. Расчетное время устройства бетонной смеси в

контуре проходимой выработки принято из расчета на 7-ые сутки.

Вокруг проектируемого ствола произведено бурение замораживающих скважин и произведен монтаж замораживающих колонок для устройства ледопородного ограждения (далее – ЛПО), радиальная протяженность (толщина) которого определяется по известной формуле Домке [4]:

$$t = R \cdot \left[0,29 \cdot \left(\frac{P_{\theta}}{\sigma_{сж}} \right) + 2,3 \cdot \left(\frac{P_{\theta}}{\sigma_s} \right)^2 \right] = 4,75 \cdot \left(0,29 \cdot \left(\frac{0,72}{0,5} \right) + 2,3 \cdot \left(\frac{0,72}{1} \right)^2 \right) = 7,64 \text{ м}, \quad (1)$$

где R – радиус ствола вчерне, м;

P_{θ} – давление воды на ЛПО, МПа;

σ_s – предел прочности на одноосное сжатие замороженных пород, МПа;

$\sigma_{сж}$ – допустимое напряжение замороженных пород на сжатие, $\sigma_{сж} = \sigma_s / k_s$, МПа;

k_s – коэффициент запаса, $k_s = 2 \div 3$.

Исходя из формулы (1), $r_2 = 12,39$ м, с характеристиками $E_2 = 15350$ МПа (модуль упругости пород в замороженном состоянии), $\nu_2 = 0,33$ (коэффициент Пуассона пород в замороженном состоянии).

Ниже приведен алгоритм расчета крепи вертикального шахтного ствола, рекомендуемый нормативными документами [5].

Выполним расчет крепи на горное давление:

- определяем расчетные вспомогательные величины:

$$\begin{aligned}
c_1 &= \frac{r_1}{r_0} = \frac{4,75}{4,25} = 1,117; \quad c_2 = \frac{r_2}{r_0} = \frac{12,39}{4,25} = 2,915; \quad c_1^2 = 1,247; \quad c_2^2 = 8,497; \\
x_1 &= 3 - 4 \cdot v_1 = 3 - 4 \cdot 0,2 = 2,2; \quad x_2 = 3 - 4 \cdot v_2 = 3 - 4 \cdot 0,3 = 1,8; \quad x_0 = 3 - 4 \cdot v_0 = 3 - 4 \cdot 0,35 = 1,6; \\
G_1 &= \frac{E_1}{2(1+v_1)} = \frac{14824}{2(1+0,2)} = 6176 \text{ МПа}; \quad G_2 = \frac{E_2}{2(1+v_2)} = \frac{15350}{2(1+0,3)} = 5903 \text{ МПа}; \\
G_0 &= \frac{E_0}{2(1+v_0)} = \frac{7000}{2(1+0,35)} = 2592 \text{ МПа}; \\
d_{1(1)} &= c_1^2 \cdot (x_1 + 1) = 1,247 \cdot (2,2 + 1) = 3,99; \quad d_{1(2)} = c_2^2 \cdot (x_2 + 1) = 8,497 \cdot (1,8 + 1) = 23,79; \\
d_{2(1)} &= 2c_1^2 + x_1 - 1 = 2 \cdot 1,247 + 2,2 - 1 = 3,694; \quad d_{2(2)} = 2c_2^2 + x_2 - 1 = 2 \cdot 8,497 + 1,8 - 1 = 17,79; \\
d'_{1(1)} &= c_1^2 \cdot (x_1 - 1) + 2 = 1,247 \cdot (2,2 - 1) + 2 = 3,496; \quad d'_{1(2)} = c_2^2 \cdot (x_2 - 1) + 2 = 8,497 \cdot (1,8 - 1) + 2 = 8,797; \\
d'_{2(1)} &= x_1 + 1 = 2,2 + 1 = 3,2; \quad d'_{2(2)} = x_2 + 1 = 1,8 + 1 = 2,8,
\end{aligned}$$

где G – модуль сдвига i -го материала;

- определяем расчетную вспомогательную величину $\chi_{0(2,1)}$ по формуле:

$$\chi_{0(2,1)} = \frac{G_2 \cdot c_2^2 - 1}{G_1 \cdot c_1^2 - 1} = \frac{5903 \cdot 8,497 - 1}{6176 \cdot 1,247 - 1} = \frac{44254,7}{1525,4} = 29,01;$$

- определяем коэффициент передачи напряжений на контурах слоев:

$$\begin{aligned}
K_{0(2)} &= \frac{d_{1(2)}}{d_{2(2)} + \chi_{0(2,1)} \cdot d'_{1(1)}} = \frac{23,79}{17,79 + 29,01 + 3,496} = \frac{23,79}{119,2} = 0,19; \\
K_{0(3)} &= \frac{x_0 + 1}{2 + \frac{G_0}{G_2} \cdot \frac{1}{c_2^2 - 1} \cdot (d'_{1(2)} - K_{0(2)} \cdot d'_{2(2)})} = \frac{1,6 + 1}{2 + \frac{2592}{5903} \cdot \frac{1}{8,497} \cdot (8,497 - 0,19 \cdot 2,8)} = \frac{2,6}{2,41} = 1,078.
\end{aligned}$$

Перед тем как определять эквивалентные напряжения на бесконечности, произведем математические преобразования коэффициента Баудендистела-Булычева (коэффициента разгрузки), который входит в эту формулу, с целью его адаптации для условий применения при проходке специального способа – замораживания горных пород.

Коэффициент разгрузки может быть определен из одномерного анализа смещений контура сечения незакрепленной выработки по формуле [3]:

$$\alpha^* = 1 - \frac{U_0}{U_\infty}, \quad (2)$$

где U_∞ – полные смещения пород при $t \rightarrow \infty$ и $l \rightarrow \infty$ (l – расстояние до забоя выработки);

U_0 – начальные смещения пород.

В соответствии с (2) множитель α^* с учетом замороженных пород равен:

$$\alpha^f = 1 - \frac{U_0^f}{U_\infty^f}. \quad (3)$$

Смещения контура сечения незакрепленной выработки на значительном удалении от забоя без учета замороженных пород определяются выражением:

$$U_{\infty} = r_0 \cdot \frac{\sigma^{(0)}}{2G_0}, \quad (4)$$

где $\sigma^{(0)}$ – начальные напряжения в массиве, $\sigma^{(0)} = \gamma \cdot H$, МПа;

H – глубина, м.

В соответствии с принципом Вольтерра [3] и методом переменных модулей смещения с учетом замораживания пород составят:

$$U_{\infty} = r_0 \cdot \frac{\sigma^{(0)}}{2G_{\infty}}, \quad (5)$$

где G_{∞} – переменный модуль сдвига, МПа.

Из зависимостей (4) и (5) следует, что:

$$U_{\infty}^f = U_{\infty} \cdot \frac{G_0}{G_{незам.}}. \quad (6)$$

По аналогии можно допустить, что в сечении выработки, отстоящем от забоя на l_0 (время от момента обнажения пород до ввода в работу крепи), смещения контура сечения ствола с учетом замораживания пород:

$$U_0^f = U_0 \cdot \frac{G_0}{G_{зам.}}. \quad (7)$$

Подставляя (6) и (7) в (3), получаем:

$$\alpha^f = 1 - \frac{U_0}{U_{\infty}} \cdot \frac{G_{незам.}}{G_{зам.}}, \quad (8)$$

т.к.

$$\frac{U_0}{U_{\infty}} = 1 - \alpha^*, \quad (9)$$

получаем:

$$\alpha^f = 1 - (1 - \alpha^*) \cdot \frac{G_{незам.}}{G_{зам.}}, \quad (10)$$

учитывая то, что:

$$G_{незам.} = \frac{E_0}{2(1+\nu_0)}; \quad G_{зам.} = \frac{E_2}{2(1+\nu_2)}; \quad \alpha^* = 0,6 \cdot \exp\left(-1,38 \frac{l}{R}\right), \quad (11)$$

подставляем (11) в (10) и получаем рекомендуемую для данных условий формулу:

$$\alpha_{рек}^f = 1 - \frac{\left(1 - 0,6 \cdot \exp\left(-1,38 \frac{l}{R}\right)\right) \cdot E_0 \cdot (1+\nu_2)}{E_2 \cdot (1+\nu_0)}. \quad (12)$$

Рассчитаем скорректированный множитель для нашего случая:

$$\alpha_{рек}^f = 1 - \frac{\left(1 - 0,6 \cdot \exp\left(-1,38 \frac{1,5}{4,75}\right)\right) \cdot 7000 \cdot (1+0,3)}{15350 \cdot (1+0,35)} = 0,731. \quad (13)$$

Для сравнения рассчитаем множитель для нашего случая без учета замораживания:

$$\alpha = 0,6 \cdot \exp\left(-1,38 \frac{1,5}{4,75}\right) = 0,38.$$

Проведя сравнения полученных результатов, стоит отметить, что этот множитель не отражает реальной геомеханической обстановки в районе нахождения элемента крепления, и, следовательно, для дальнейших расчетов необходимо применять скорректированный множитель $\alpha_{рек}^f$.

Определяем эквивалентные напряжения на бесконечности:

$$P_{0eq} = \alpha_{рек}^f \cdot \gamma \cdot H \cdot \frac{2}{x_0 + 1} = 0,731 \cdot 0,01946 \cdot 112,5 \cdot \frac{2}{1,6 + 1} = 1,2319 \text{ МПа.} \quad (14)$$

Далее рассчитаем нормальные напряжения на контакте крепи с массивом (зоной замораживания пород) по формуле:

$$p_{0(1)} = P_{0eq} \cdot K_{0(3)} \cdot K_{0(2)} = 1,2319 \cdot 1,078 \cdot 0,19 = 0,252 \text{ МПа.}$$

Находим вспомогательную расчетную величину $m_{1(1)}$ по формуле:

$$m_{1(1)} = \frac{2c_1^2}{c_1^2 - 1} = \frac{2 \cdot 1,247}{1,247 - 1} = \frac{2,494}{0,247} = 10,09.$$

Определяем напряжения в крепи. Для бетонной крепи формула:

$$\sigma_{\theta(1)}^{in} = p_{0(1)} \cdot m_{1(1)} = 0,252 \cdot 10,09 = 2,54 \text{ МПа.}$$

Выполним расчет крепи на гидростатическое давление.

Расчет бетонной (фильтрующей) крепи при наличии зоны замороженных пород производится по формулам с учетом величин напоров подземных вод, гасящихся в крепи и слое замороженных пород:

$$P_{0eq} = H_w \cdot \frac{2}{x_0 + 1} = 0,72 \cdot \frac{2}{1,6 + 1} = 0,55 \text{ МПа,}$$

где H_w – статический напор подземных вод, м;

$$p_{0(1)} = P_{0eq} \cdot K_{0(3)} \cdot K_{0(2)} = 0,55 \cdot 1,078 \cdot 0,19 = 0,11 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{\theta(1)}^{in} = p_{0(1)} \cdot m_{1(1)} = 0,11 \cdot 10,09 = 1,14 \text{ МПа.}$$

В статье сделано предположение, что давление морозного пучения, создаваемое за счет устройства вокруг проектируемой выработки ЛПО, уже учтено при математическом выборе множителя (коэффициента разгрузки) и в дальнейших расчетах не рассматривается. Эта гипотеза подлежит подтверждению ее исследованиями.

Учитывая вышесказанное, суммарные напряжения в крепи от действия всех учтенных нагрузок равны: $\sigma_{\theta(1)}^{in} = 1,14 + 2,54 = 3,68 \text{ МПа.}$

Сравнивая полученное напряжение с допустимыми, имеем:

$$k_3 = \frac{R_b}{\sigma_{\theta(1)}^{in}} = \frac{9,9}{3,68} = 2,6,$$

где k_3 – коэффициент запаса.

Рекомендуется снизить марку бетона и толщину крепления.

Заключение

1. Предложен скорректированный множитель (коэффициент разгрузки) $\alpha_{рек}^f$ (12).
2. Учет влияния давления морозного пучения на крепь осуществлен с помощью рассчитанного по специальной методике скорректированного множителя.
3. Приведен пример расчета крепи вертикального шахтного ствола с учетом скорректированного множителя $\alpha_{рек}^f$, учитывающего специальный способ проходки – замораживание горных пород.

Список цитированных источников

1. Мишедченко, О.А. История развития способа искусственного замораживания пород / О.А. Мишедченко // Семинар № 19, МГГУ. – М., 2010. – С. 21-22.
2. Железцов, А.П. Трест «Шахтоспецстрой» 60 лет деятельности и развития специальных способов проходки шахтных стволов / А.П. Железцов. – М.: Джей Ти Принт, 2003 – С. 293-335.
3. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – С. 4-5.
4. Картозия, А.Б. Шахтное и подземное строительство / А.Б. Картозия. – М.: Академия горных наук, 2001. – Т. I. – 338 с.
5. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи / ВНИМИ, ВНИИОМШС Минуглепрома СССР. Составлено к главе СНиП II-94-80 «Подземные горные выработки». – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.

Lipnitsky N.A.

The adjustment of ratings of pressure on a concrete lining during sinking of a shaft by method of freezing

The article describes the method of adjustment of recommended factor (coefficient of discharge), which allows you to come down from the spatial character of deformation of rocks near roadhead to the scheme of calculations that takes into account the use of a special method of penetration – freezing of rocks.

Поступила в редакцию 19.01.2016 г.

УДК 622.235.6:550.348.098.64(045)(476)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ НА КАРЬЕРЕ «МИКАШЕВИЧИ»

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

В статье представлены результаты исследований сейсмического действия массовых взрывов с использованием вероятностных и компьютерных моделей.

Введение

Оценка сейсмического действия массовых взрывов в теории и на практике в общем случае выполняется как с помощью специальных шкал, так и с применением методов прогноза параметров сейсмических колебаний, определяющих их сейсмическую опасность.

Для характеристики относительной силы землетрясений по их энергии в очаге применяют энергетические классификации. Балльная оценка используется для характеристики интенсивности сотрясений в разных районах земной поверхности. Ее значения соотносятся с ощущениями людей и вызываемыми последствиями сейсмических колебаний для объектов.

Наибольшей популярностью среди энергетических классификаций пользуется шкала К.Рихтера, который ввел понятие магнитуды. Магнитуда характеризует силу землетрясений в очаге, и, в отличие от балльности, ее значения соотносятся не с вызываемыми последствиями колебаний, а с высвобождаемой энергией сейсмических волн в гипоцентральной области. Магнитуда, равная нулю, приблизительно соответствует энергии землетрясений $1,7 \cdot 10^5$ Дж. Увеличение ее на единицу эквивалентно возрастанию количества энергии на каждом шаге примерно в 27 раз по сравнению с предыдущим значением. Например, при толчке с магнитудой М6 высвобождается в 27 раз больше энергии, чем с магнитудой М5 и в 729 раз больше, чем с магнитудой М4.

Для оценки сейсмического действия взрывов в странах Союзного государства и СНГ получила шкала, устанавливающая определенные соотношения между скоростью колебаний, силой сотрясений в баллах и вероятными их последствиями для окружающей среды [1].

Так как силу сотрясений при взрывах в современных шкалах балльности оценивают по масштабам разрушений объектов, то применительно к действующим объектам, включающими жилой массив г. Микашевичи, такой подход не может быть приемлемым, и возникает задача прогноза интенсивности сейсмических колебаний при взрывах, мерой которых служит скорость смещений грунта при взрывах.

Результаты исследований

Большое значение моделирования интенсивности сейсмических колебаний обусловлено:

- развитием техники и технологии горных работ;
- приближением взрывов к охраняемым объектам;
- проблемами рациональной застройки территорий, подверженных сейсмическим колебаниям;

- имеющимися случаями повреждений объектов от сотрясений;
- изменениями условий производства взрывов.

Взрывные работы в карьере «Микашевичи» производятся в соответствии с требованиями «Единых правил безопасности при взрывных работах», «Временной инструкции по организации и ведению массовых взрывов скважинных зарядов на открытых горных работах» и «Типового проекта ведения буровзрывных работ в карьере «Микашевичи».

Из-за большого водопритока водоносного горизонта кристаллических пород и трещиноватости пород большинство скважин обводнено. Высота водяного столба в скважинах изменяется от 3 до 15 м. В связи с этим на зарядку скважин расходуются эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ) нитрониты марок Э-70, Э-100, а также водоустойчивые ВВ (гранулотол, эмульсен-ГА). Применяют скважины вертикальные. Расположение скважин в плане прямоугольное, квадратное либо в шахматном порядке.

В нижней части относительно сухих скважин и в верхней части обводненных скважин применяются нитронит Э-50. Заряды размещаются в скважинах диаметром 250 мм, 215 мм и 170 мм.

Способ взрывания – неэлектрический. В качестве средств взрывания применяются системы неэлектрического инициирования «ИСКРА».

Устройства ИСКРА-П применяются в магистральных и участковых линиях коммутационной сети. В скважинах применяются устройства ИСКРА-С. В качестве промежуточных детонаторов для инициирования ВВ в скважинах применяются шашки ЗТП-800, ТГ-500, ТГ-П850, ПТП-750, ПТУ-800Л, ПТУ-1000Л.

В зависимости от направления перемещения и конфигурации фронта отбойки применяются схемы короткозамедленного взрывания: диагональная, диагональная с трапециевидным или клиновым врубом и другие.

Конструкция скважинного заряда – сплошная, комбинированная, рассредоточенная.

Охраняемые объекты при взрывах в карьере «Микашевичи» размещены на плоской озерно-аллювиальной равнине с подстилающими рыхлыми породами с высоким уровнем грунтовых вод. Жилой массив г. Микашевичи приурочен к восточной стороне карьера, и с учетом планируемого развития горных работ его приближение к карьере достигнет около 600 метров. К ответственным промышленным объектам следует отнести электрическую подстанцию и хвостохранилище, располагаемые с западной стороны карьера. Однако их удаление от карьера, в том числе с учетом перспективы его расширения, не превысит 1 км. Газопровод высокого давления (1,2 МПа) предназначен для газоснабжения объектов РУПП «Гранит» начинается на северо-восточной окраине г. Микашевичи у существующего газопровода и проходит в западном направлении, пересекая автодорогу Микашевичи – РУПП «Гранит» и железную дорогу на Брест. Далее трасса проходит параллельно железной дороге на запад, сворачивая к северу, вторично пересекая автодорогу и железную дорогу, и заканчивается в районе территории СУ-63, где расположена газораспределительная подстанция (ГРП). Газопровод собран из стальных труб диаметром 200 мм и толщиной стенок 4 мм, на глубине 1,0 м от поверхности.

С учетом низких фильтрационных характеристик грунтов отдельные участки трассы могут подтапливаться талыми и дождевыми водами. Уровень грунтовых вод на большей части трассы выше глубины укладки труб. В соответствии с классификацией Единых правил безопасности при ведении взрывных работ грунты в основании газопровода относятся к водонасыщенным, с максимальным значением коэффициента сейсмичности.

В общем виде скорость смещений грунта при взрывах в упрощенном виде может быть представлена зависимостью [2]:

$$V = K \cdot \frac{\sqrt{Q}}{R^n},$$

где K – коэффициент сейсмичности;

Q – масса заряда на ступень замедления, кг;

R – расстояние до взрыва, м;

n – показатель затухания сейсмоволн с расстоянием, $n = 1,5$.

Коэффициент сейсмичности K в приведенной зависимости носят случайный характер. Его особенное положение определяется тем, что коэффициент сейсмичности оказывает сильное влияние на допустимые параметры взрывов и, как следствие, на технико-экономические показатели работы карьера и, в частности, на производственную мощность карьеров, производительность горного оборудования, себестоимость добычи полезного ископаемого и т.п.

В представленной нами модели сейсмического действия взрыва, с одной стороны, участвуют детерминированные параметры, к которым следует отнести расстояние до взрыва, массу заряда на ступень замедления, показатель затухания скорости смещений с расстоянием, а с другой – параметры, влияющие на результат, но которые в явном виде в модели не определены, и вызывающие случайные изменения коэффициента сейсмичности и, как следствие, изменения скорости смещений грунта. При установленном законе теоретического распределения случайных значений коэффициента сейсмичности возможно компьютерное моделирование сейсмического эффекта, обусловленного влиянием случайных факторов.

Для описания случайных изменений высоты уступов используются различные теоретические распределения. В ряде исследований рассматривается распределение Пирсона III типа, известное также как гамма-распределение. Выполненный нами анализ показывает, что коэффициент сейсмичности подчиняется SL-распределению Джонсона. Знание законов распределения коэффициента сейсмичности позволяет осуществлять его прогнозирование, а с ним – и величину скорости смещения грунта в результате сейсмических колебаний с заданной вероятностью при помощи случайных многократных испытаний, выполняемых на компьютере. Необходимым этапом решения данной задачи является получение случайных значений коэффициента, подчиняющегося установленному распределению с помощью нормированных случайных величин с равномерным или нормальным распределением.

Получение случайных чисел, имеющих заданное распределение, возможно путем использования известных соотношений между теоретическим распределением, которому подчиняется случайная величина, и случайными величинами, имеющими нормальное или равномерное распределение.

Рассмотрим уравнение, связывающее нормированное значение коэффициента сейсмичности с параметрами формы его теоретического распределения, подчиняющегося SL-распределению Джонсона:

$$z = \gamma^* + \eta \ln K.$$

Решая его относительно K получим:

$$z - \gamma^* = \eta \ln K \quad \text{и} \quad \ln K = \frac{z - \gamma^*}{\eta},$$

откуда

$$K = \exp\left(\frac{z - \gamma^*}{\eta}\right),$$

где z – нормированное значение коэффициента сейсмичности, определяемое заданной величиной вероятности отсутствия повреждений. Для вероятности $p = 0,9$ $z = 1,28$;

η, γ^* – параметры формы теоретического распределения коэффициента сейсмичности.

Принимая во внимание, что параметры формы SL-распределения Джонсона эквивалентны $\gamma^* = -\frac{\mu}{\sigma}$, $\eta = \frac{1}{\sigma}$, представим уравнение для случайных значений K в виде:

$$K = \exp(\sigma \cdot z + \mu),$$

где σ – стандартное отклонение SL-распределения Джонсона;

z – нормированная случайная величина, взятая из нормально распределенной совокупности;

μ – средняя SL-распределения Джонсона.

Значения случайной величины z из нормально распределенной совокупности содержатся в специальных таблицах.

Вычислительные эксперименты выполнены для взрывов с массой заряда на ступень замедления, равной 3200 кг, на расстоянии от взрыва 900 м, что можно отнести к типовой ситуации при взрывах на карьере «Микашевичи». Фрагмент результатов статистического моделирования на ЭВМ в среде Excel представлен в нижеследующей таблице.

Таблица. – Результаты моделирования максимальной скорости и амплитуды смещений для уровня вероятности $p = 0,9$

Случайные числа, имеющее нормированное нормальное распределение z	$\sigma \cdot z + \mu$	Коэффициент сейсмичности K	Максимальная скорость смещений $V_{\text{макс}}$, см/с ($p = 0,9$)	Амплитуда смещений максимальная, мм ($p = 0,9$)
1	2	3	4	5
–1,276	5,004884	149,1398	0,31	0,015
– 0,318	5,571062	262,713	0,55	0,027
–1,377	4,945193	140,498	0,29	0,015
2,334	7,138394	1259,404	2,64	0,126
–1,136	5,087624	162,0045	0,34	0,015
0,414	6,003674	404,9137	0,85	0,042
–0,494	5,467046	236,7598	0,5	0,024
1,048	6,378368	588,9657	1,23	0,06
0,347	5,964077	389,1936	0,82	0,039
0,637	6,135467	461,9548	0,97	0,045
2,176	7,045016	1147,127	2,4	0,114
–1,185	5,058665	157,3803	0,33	0,015
0,972	6,333452	563,0971	1,18	0,057
1,21	6,47411	648,1421	1,36	0,066
2,647	7,323377	1515,313	3,17	0,15

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
0,398	5,994218	401,1029	0,84	0,039
0,846	6,258986	522,6887	1,1	0,054
0,654	6,145514	466,6194	0,98	0,048
0,522	6,067502	431,6012	0,9	0,042
-1,288	4,997792	148,0858	0,31	0,015
1,372	6,569852	713,2643	1,49	0,072
0,854	6,263714	525,1658	1,1	0,054
-0,148	5,671532	290,4792	0,61	0,03
-1,148	5,080532	160,8596	0,34	0,015
0,348	5,964668	389,4237	0,82	0,039
0,284	5,926844	374,9692	0,79	0,039
-1,016	5,158544	173,9111	0,36	0,018
1,603	6,706373	817,5998	1,71	0,081

Из анализа таблицы следует, что в ряде случаев, из представленных в таблице, скорость смещения превысила 1,5 см/с. Следовательно, результаты вычислительного эксперимента позволяют без производства промышленных экспериментов принять решение о необходимости корректировки допустимой массы взрывающего ВВ на ступень замедления для охраняемых объектов с допустимой скоростью 1,5 см/с (городской поселок). Оценка параметров сейсмических колебаний по приведенным выше методикам в районе охраняемых объектов с учетом планируемого расширения границ карьера и приближения его к объектам до 900 м при типовых параметрах взрывов показывает, что максимальная амплитуда смещения может достигать значений 0,15 мм при преобладающем периоде смещений 0,3 с.

Представляет интерес сравнение полученных данных с результатами компьютерного моделирования параметров колебаний при взрывах.

Моделирование сейсмического эффекта взрывов выполнено с помощью компьютеризированной системы выполнения исследовательских и проектных задач горной сейсмики [2]. Система позволяет в созданной базе данных «Параметры взрывов – параметры колебаний» по заданным ограничениям (так называемой «заявке») сформировать файл, содержащий систематизированные данные по требуемым параметрам взрывов и вызываемым ими колебаниям.

Ограничения на поиск в базе данных требуемых параметров сформированы нами, исходя из применяемых на практике в гранитном карьере типовых параметров взрывов: общая масса ВВ на взрыв – 80 т, число ступеней замедления – 25, максимальная масса ВВ на ступень замедления – 3200 кг, расстояние 100-1000 м. Скорость смещений грунта задана в интервале 0,1-24 см/с, амплитуда – 0,01-10 мм, период – любой.

Результаты моделирования сейсмического эффекта представлены в виде графика, отражающего ожидаемые амплитуды смещения грунта (мм) в зависимости от расстояния (рисунки).

Из графика видно, что в диапазоне примерно 600-900 м возможная амплитуда колебаний грунта с высокой вероятностью ($p = 0,9$) не превысит 0,2 мм, что неплохо согласуется с результатами моделирования методом случайных чисел.



Рисунок. – Результаты моделирования сейсмического эффекта взрывов в карьере «Микашевичи» (зависимость амплитуды смещения грунта от расстояния)

Заключение

Оценка сейсмического действия массовых взрывов возможна на основе применения современных вероятностных и компьютерных моделей с использованием методов теории случайных чисел и компьютерных баз данных «Параметры взрывов – параметры колебаний».

Список цитированных источников

1. **Медведев, С.В.** Сейсмика горных взрывов / С.В. Медведев. – М.: Недра, 1964. – 187 с.
2. **Оника, С.Г.** Взрывы вблизи объектов / С.Г. Оника. – Минск: Тэхналогія, 2006. – 183 с.

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

Modeling of a shock effect of large-scale blasts on Mikashevichi opencast mine

The article presents the results of studies of a shock effect of large-scale blasts using probability models and computational models.

Поступила в редакцию 07.04.2016 г.

УДК 620.9-027.236(045)(476)

РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА И ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

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

В настоящее время наблюдается интерес к собственным природным ресурсам, где значительное место отводится торфяному фонду. В статье рассмотрены варианты энергоэффективного использования органогенных материалов и структура потребления торфяного топлива в Республике Беларусь. Также приведены основные физико-технические и химические характеристики основных видов торфа, которые могут использоваться в производстве пористых строительных материалов. Приведено обоснование технологических параметров и физико-механических свойств сырья, применяемого в процессах при изготовлении пористых строительных материалов. Вводятся понятия критериев полноты и комплексности использования ресурсов.

Введение

Горно-химическая отрасль при комплексном использовании минеральных ресурсов обеспечит максимальное извлечение полезных компонентов, содержащихся в горно-химических рудах, утилизацию вмещающих пород и отходов производства для удовлетворения потребностей других отраслей народного хозяйства, а также пополнит минерально-сырьевую базу отрасли за счет попутного извлечения других полезных компонентов, улучшит свои технико-экономические показатели. В настоящее время интерес наблюдается к собственным природным ресурсам, где значительное место отводится торфяному фонду. Торфяные месторождения в настоящее время востребованы как топливный ресурс, как значительный объем сельскохозяйственных угодий и как важнейший объект природоохранного использования. Новые задачи требуют для своего решения системных обращений к торфяному фонду. При этих запросах возникают трудности в формировании набора показателей, т.к. не вся необходимая информация может быть получена из имеющихся материалов [1].

Торфяная отрасль ориентирована на развитие новых инновационных производств по «альтернативным направлениям использования торфа и продукции на его основе». Эффективным вариантом использования торфа следует считать такой, который обеспечивает максимальную экономическую выгоду от использования потенциальной ценности полезного ископаемого при ограничении негативного воздействия на составляющие окружающей среды при этом использовании [2].

Особую группу нетрадиционных видов минерального сырья составляют отходы, образующиеся при добыче и переработке полезных ископаемых. Их следует рассматривать как существенные, но малововлеченные в развитие экономики ресурсы, использование которых позволило бы одновременно решать сырьевую и экологическую задачи.

В последнее время возникают новые потребности в торфяном топливе: строительство мини-ТЭЦ, потребность цементной промышленности и т.п. В программе «Торф» [3] запланирована ежегодная добыча торфа до 3 млн т на нужды сельского хозяйства для утилизации жидкого навоза крупных животноводческих ферм с получением компостов для пахотных полей. Кроме того, при анализе хода выполнения этой программы Президиум Совета Министров ориентировал причастные к этим ресурсам ми-

нистерства и ведомства на доработку программы, предусматривающую развитие новых инновационных производств по «альтернативным» направлениям использования торфа и продукции на его основе, т.е. на процессах комплексного освоения [3].

В ГНУ «Природопользования НАН Беларуси» накоплен многолетний опыт по различным направлениям использования торфа. Созданы производства по выпуску разнообразной продукции и материалов на основе торфа. Это широкий класс органических и органоминеральных удобрений, мелиоративных и удобрительных смесей, грунтов, биостимуляторов, ростовых веществ, кормовых добавок и другой продукции для сельского хозяйства, сорбционных материалов, торфощелочных реагентов, литейных и антиадгезионных составов для промышленных производств, восков, лекарственных средств, предметов бытовой химии, косметики и других продуктов [1-3].

Следует отметить, что опробованные на практике такие производства относятся к ресурсосберегающим, а предварительные технико-экономические расчеты свидетельствуют об их рентабельности. Социально-экономическое значение такого направления использования торфа заключается в расширении ассортимента товаров для населения, в экономном использовании торфа, возможном импортозамещении.

Оценка вариантов энергоэффективного использования органогенных материалов

Важным требованием к исходному сырью для многих производств комплексного использования торфа является обеспечение функционального состава. Это достигается как технологиями добычи, так и подготовкой добытого сырья (дроблением, гранулированием). Ряд производств критичен к технологическим показателям исходной продукции, в особенности к условиям хранения.

Республика Беларусь обладает большими запасами древесины и торфа, которые относят к местным видам топлива (МВТ), где в качестве местного коммунально-бытового топлива используется фрезерный торф, кусковой торф и топливные брикеты. Потребителями топливного торфа являются тепловые электростанции, коммунально-бытовые потребители печного топлива, торфобрикетные заводы, поселковые котельные торфопредприятия. Анализ потребления торфяного топлива в Республике Беларусь (рисунок 1) показывает, что наибольшим спросом пользуется брикет. Так, по статистическим данным, в балансе использования торфа в энергетических целях в стране доля топлива, отпущенного населению, составляет 55,3 %, из них 65,9 % – брикеты. Полностью обеспечивая потребности внутреннего рынка, предприятия торфяной отрасли осуществляют также поставку брикетов на экспорт.

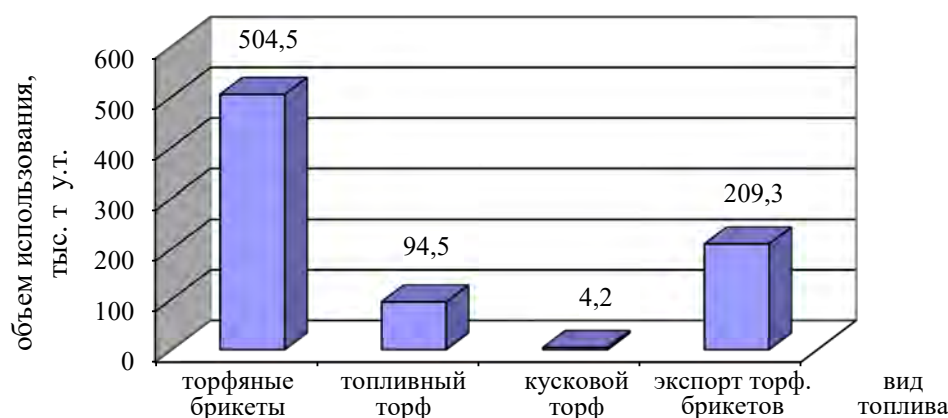
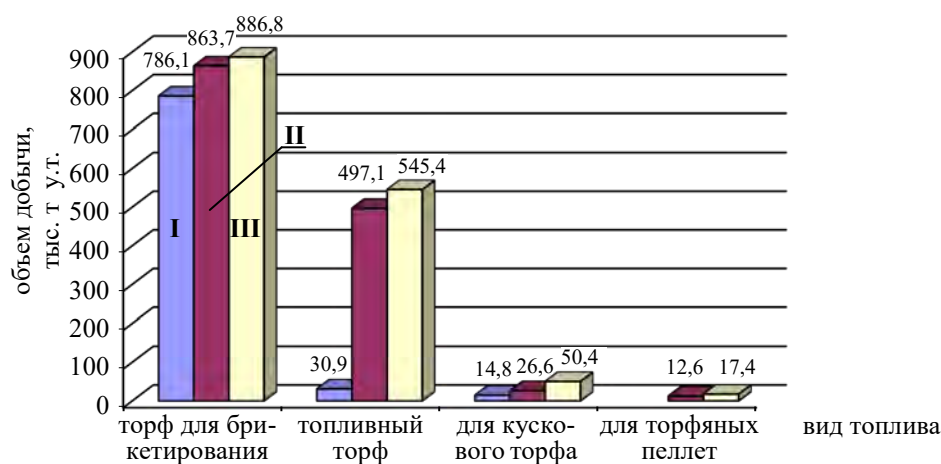


Рисунок 1. – Структура потребления торфяного топлива в Республике Беларусь

Прогноз объемов добычи торфа в Республике Беларусь на период до 2020 г. представлен на рисунке 2.



I – 2010 год; II – 2015 год; III – 2020 год

Рисунок 2. – Прогноз объемов добычи торфа в Республике Беларусь на период до 2020 г.

Согласно Государственной программе «Торф» в Беларуси предусмотрен рост объемов потребления торфа на энергетические цели, где намечено повысить производительность и снизить энергоемкость производства продукции из торфа [3].

Следует отметить, что использованием торфа и древесных отходов в различных областях строительной промышленности занимались многие ученые и организации. Часть из описанной выше продукции в настоящее время производится в регионах республики и используется во многих хозяйствах. На другие виды продукции у разработчиков имеется документация, которая необходима для организации производств.

В Республике Беларусь выявлены угленосные отложения различного возраста [4, 5]. Однако из-за их маломощности промышленная добыча угля пока не организована. Торф по сравнению с бурым углем наиболее молодой вид ископаемого минерального топлива, залежи его формируются и в современную эпоху. Теплота сгорания рабочей массы торфа колеблется в широких пределах в зависимости от влажности, массы и ее зольности (таблица 1).

Таблица 1. – Средний состав торфа, теплота сгорания при его различной влажности

Влажность	Состав рабочей массы, %					Зольность	Теплота сгорания, ккал/кг
W_p	C_p	H_p	S_p	O_p	N_p	A_p	
20	41,1	4,3	0,2	23,8	1,8	8,8	3610
40	30,9	3,2	0,2	17,8	1,3	6,6	2560
50	25,7	2,7	0,1	14,9	1,1	5,5	2030

Следует отметить, что с увеличением влажности торфа значительно уменьшается содержание углерода, что приводит к изменению теплоты сгорания.

Фрезерный торф как сырье для брикетирования и компостирования характеризуется показателями: влажностью, зольностью, различным видом, степенью разложения залежи, фракционным составом и теплотой сгорания. На современном технологическом оборудовании брикетных заводов представляется возможным брикетировать фрезерный торф всех типов. Наиболее же эффективно перерабатывать торф средней и повышенной степени разложения. Оптимальная влажность, при которой обеспечивает-

ся наиболее низкая себестоимость заводского передела, составляет 40-50 %. Предел зольности фрезерного торфа для брикетирования установлен с учетом того, что зола является балластным компонентом, снижающим теплоту сгорания топлива. Для торфо-брикетных предприятий норма предельной зольности фрезерного торфа устанавливается в зависимости от естественной зольности залежи по данным паспортизации, но не более 23 %.

Наиболее успешно перерабатывается в брикеты торф равномерного фракционного состава, состоящий из частей размером до 8 мм. Из такого торфа получается сушенка с минимальной влагоразмерностью по фракциям, что обеспечивает получение наиболее прочных брикетов. Измельчение способствует повышению плотности и влагоустойчивости. Одним из основных требований к фрезерному торфу как сырью для брикетирования является постоянство показателей его качества.

В таблицах 2-7 приведены основные физико-технические и химические характеристики основных видов торфа, которые могут использоваться при производстве пористых строительных материалов (ПСМ).

Таблица 2. – Технические свойства низинных торфов

Показатели	Средние значения по группам торфа		
	древесная	травяная	моховая
Степень разложения R , %	45	29	21
Зольность на сухое вещество A^c , %	9,6	6,7	6,5
Влажность W , %	87	91	92
Теплота сгорания Q^c , кДж/кг	23,20	23,36	22,69

Таблица 3. – Полная влагоемкость низинных торфов, кг/кг

Показатели	Средние значения по группам торфа		
	древесная	травяная	моховая
Полная влагоемкость, кг/кг средняя	8,5	12,5	11,4

Таблица 4. – Показатели элементного и группового химического составов органической массы низинного торфа, %

Элементный и групповой химический составы, %	Средние значения по группам торфа		
	древесная	травяная	моховая
Элементный состав			
Углерод С	58,4	57,8	36,7
Водород Н	5,7	5,9	3,7
Азот N	2,7	2,7	2,2
Сера S	0,7	0,4	0,6
Кислород О	32,5	33,2	34,8
Групповой состав			
Битумы (Б)	3,7	4,4	3,9
Легкогидролизные вещества (ЛГ)	20,9	26,4	29,3
Редуцирующие вещества (РВ)	9,1	14,8	17,1
Гуминовые кислоты (ГК)	41,6	38,9	36,1
Фульвокислоты (ФК)	17,4	14,3	16,5
Целлюлоза (Ц)	1,5	2,4	4,0
Лигнин (Л)	13,9	12,7	9,2

Здесь следует отметить, что в технологии получения ПСМ выгоднее использовать древесную и травяную группу торфа, которые содержат больше углерода и имеют высокую теплоту сгорания при агломерации.

Таблица 5. – Состав зольной части низинных торфов

Показатель	Средние значения по группам торфа		
	древесная	травяная	моховая
Средние значения зольной части, % (абсолютно сухого вещества) по разным месторождениям РБ, в зависимости от условий образования торфа	2,7	1,3	2,1
	3,4	2,2	2,3
	1,2	1,0	0,9
	0,8	0,5	0,6

Таблица 6. – Характеристика химического состава низинного торфа, % на сухое вещество

Показатель	Год	Химический состав					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	P ₂ O ₅
% на сухое вещество	1980	20,3	4,2	0,5	2,5	1,2	0,3
	2011	44,24	6,63	13,28	23,52	6,60	1,34

Таблица 7. – Групповые компоненты и элементный состав, % на органическое вещество

Показатель	Групповые компоненты и элементный состав								
	Б	ЛГ	Гуминовые вещества	Трудногидролизуемые вещества	Негидролизуемый остаток	С	Н	Н	S+O
% на органическое вещество	3,9	37,7	25,2	8,9	28,5	52,1	6,3	4,3	36,8

Физико-механические свойства сырья, применяемого в технологических процессах

Аглопоритовый щебень, песок, керамический блок, кирпич относятся к искусственным пористым материалам, получаемым в результате термической обработки шихт из алюмосиликатных материалов природного происхождения и отходов промышленности. Применяют их в качестве заполнителей при изготовлении теплоизоляционных и конструкционных строительных материалов, бетонов, а также в качестве утепляющих засыпок. Структурно-механические свойства сырьевых материалов определяют соответствующие методы их подготовки к термической обработке. Для выбора метода подготовки шихты основные исходные сырьевые материалы условно разделяют на следующие три группы: 1 – сухие плотные или зернистые материалы: природные глинистые и углесодержащие сланцы, получаемые при добыче и обогащении угля, и топливные кусковые шлаки; 2 – рыхлые природные глинистые породы и отходы промышленности: глины, суглинки, супеси, лессы, а также глинистые углесодержащие отходы добычи и обогащения угля; 3 – сухие пылевидные или зернистые материалы: золы от сжигания углей и газогенераторные золы.

Природные глинистые породы применяют в производстве аглопорита, хотя с экономической точки зрения для этой цели целесообразны отходы промышленности. Добавки выбирают с учетом наличия местных сырьевых ресурсов и характеристик основных компонентов шихты. При избыточном количестве топлива в топливосодержащем сырье в шихту вводят возврат (до 20 %), а также горелую или глинистую породу, а при недостатке топлива – уголь или углесодержащую добавку. Введение в шихту древесных опилок (до 10 %) и лигнина (до 25 % по объему) увеличивает пористость и ускоряет процессы горения топлива и спекания. Добавка сухой золы ТЭС снижает влажность обводненных глин и снижает расход топлива за счет содержащихся в ней прокаленных материалов и несгоревшего углерода. Содержание топлива в шихте при использовании глинистых пород обычно 6-8, шахтных пород – 8-10, золы ТЭС – 10-12 % по массе. Предельный размер гранул шихты не должен превышать 10-12 мм, а размер составных ее частей: исходного сырья – 5 мм, угля – 3 мм, твердых добавок от 5 мм (плотных) до 10 мм (пористых).

По своему химическому составу вскрышные породы месторождения «Ольшанка» раньше использовались для производства аглопорита с добавками местного топлива, которое может создавать необходимую теплоту (до 4200 ккал/кг) сгорания в зоне агломерационной машины на основе торфа. В лабораторных условиях ранее использовались фрезерный торф, гранулы, сапропель, древесные опилки и лигнин, которые являются отходами в топливной, деревообрабатывающей и гидролизной промышленности [6].

Структурно-механические свойства сырьевых материалов определяют соответствующие методы их подготовки к термической обработке. Основная технологическая операция при производстве аглопорита – это спекание шихты на решетке агломерационной машины непрерывного действия, где теплота сгорания топлива должна быть выше 4000 ккал/кг. Спеканию подвергаются малопластичные глинистые породы, которые при обжиге не вспучиваются. Некоторые вскрышные породы горных предприятий Республики Беларусь отвечают этим требованиям. За счет горения угля, который вводится в шихту, развивается температура до 1300 К. Это приводит к спеканию шихты в пористую остеклованную массу. Следует отметить, что протекающие процессы тепло-массопереноса не заканчиваются в зонах сушки и нагрева, а накладываются друг на друга по всей длине ленты и развиваются параллельно.

В Республике Беларусь в настоящее время выпускают в основном кирпич керамический, песок и щебень аглопоритовые, песок перлитовый, плиты теплоизоляционные. Аглопорит используется в качестве заполнителя легких бетонов и теплоизоляционных засыпок. Для получения этих материалов и изделий требуется добыть, переработать большое количество минерального сырья, материалов и топлива. Поэтому необходимы своевременная разработка, эффективное использование наиболее совершенных, высокопроизводительных и экономичных машин и оборудования.

Сырье для производства аглопорита характеризуется равномерной микроструктурой. Глинистое вещество его имеет полиминеральный состав и представляет собой неоднородную смесь гидрослюда и каолита. Сырье месторождения «Фанипольское» относится к группе сырья со средним содержанием включений; по размеру включений – к группе с крупными, мелкими и средними включениями; по виду включений – к группе с включениями железистых и кварцевых минералов; по содержанию тонкодисперсных фракций – к группе грубодисперсного глинистого сырья; по пластичности – к группе непластичного глинистого сырья; по огнеупорности – к группе тугоплавкого сырья (таблица 8) [7].

Таблица 8. – Химический состав глинистого сырья месторождений «Фанипольское» и «Фаниполь»

Наименование месторождения	Содержание оксидов, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
«Фанипольское»	76,03	10,57	0,48	2,16	2,80	1,00	3,70
«Фаниполь»	80,30	6,30	0,34	2,42	3,54	1,60	2,50

Число пластичности сырья от 0 до 12, огнеупорность 1400-1460 °С, карьерная влажность 18-23 %. В таблице 9 приведен зерновой состав глинистого сырья месторождений «Фанипольское» и «Фаниполь».

Таблица 9. – Зерновой состав глинистого сырья месторождений «Фанипольское» и «Фаниполь»

Наименование месторождения	Размер частиц, мм					
	более 0,25	0,23-0,01	менее 0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	менее 0,001
	Содержание фракций, %					
«Фаниполь»	6,04	71,43	22,53	5,84	7,69	9,01
«Фанипольское»	1,20	63,85	32,95	9,63	11,50	11,80

Основные технологические параметры производства аглопорита разрабатывались применительно к агломерационной машине СМ-961, где высота спекаемого слоя составляла 300 мм, разрежение при зажигании – 60 мм вод. ст., при спекании – 200 мм вод. ст., выгрузка спека осуществлялась в основном через 45 мин. Верхний предел крупности гранул торфа 7-10 мм, наличие мелочи менее 1 мм нежелательно (увеличивается выход возврата, уменьшается вертикальная скорость спекания шихты). Для стабилизации процесса спекания шихты с частичной заменой угля «АШ» торфом необходимо обеспечить дополнительный нагрев поверхности зажигаемого слоя шихты в сравнении с шихтой общепринятой (суглинок – возврат – уголь «АШ»). Применение импортозамещающей технологии позволит улучшить некоторые показатели по утилизации и использованию МВТ и вторичных энергоресурсов, где расчет можно производить через критерии, связывающие полноту и комплексность использования местных ресурсов.

Полнота и комплексность использования ресурсов

В настоящее время остро стоит проблема экономии, снижения и рационального использования сырья, топлива, электро- и теплоэнергии, снижения материальных затрат. Рациональное освоение этого природного ресурса, означает полное ресурсосберегающее использование потенциальной ценности этого сырья с получением широкого набора различных продуктов, не имеющих аналогов при переработке других видов природных ресурсов.

Полнота и комплексность использования ресурсов может быть оценена с помощью ряда критериев.

1. Критерий рациональности K_p

$$K_p = \frac{Q_u}{Q_n} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Q_u – количество ресурсов, использованных в производстве;

Q_n – количество ресурсов, изъятых из природной среды.

2. Критерий комплексности K_k

$$K_k = \frac{Ц_n}{Ц_c} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $Ц_n$ – ценность продукции, фактически произведенной из минерального сырья;

$Ц_c$ – суммарная ценность компонентов в сырье.

3. Критерий безотходности K_o

$$K_o = \frac{M_y}{M_o} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где M_y – масса утилизируемых отходов;

M_o – масса отходов, выделившихся в процессе производства.

Комплексность использования сырья можно также охарактеризовать критерием использования:

$$K_{исп} = N_p / N_T, \quad (4)$$

где N_p – число реализуемых вариантов использования сырья;

N_T – число теоретически возможных вариантов использования.

Выводы

Установлено, что структура потребления торфа в настоящее время в основном сводится к производству брикетов и производству сельскохозяйственной продукции, малая доля торфа используется для производства кускового торфа, паллет и экспорта, а в производстве ПСМ не используется.

1. В последнее время найдены новые направления использования фрезерного торфа и дробленых торфяных брикетов в энергетике вместо импортного газа.

2. Установлено, что использование МВТ и вторичных энергетических ресурсов в производстве ПСМ позволит улучшить показатели рациональности, комплексности, безотходности и снизить энергозатраты на производство единицы продукции.

3. Показано, что с увеличением влажности торфа значительно уменьшается содержание углерода, что приводит к изменению теплоты сгорания, а также следует отметить, что в технологии получения ПСМ выгоднее использовать древесную и травяную группу торфа, которые содержат больше углерода и имеют высокую теплоту сгорания при агломерации.

4. Проведенные нами лабораторные и полупромышленные исследования выявили основные направления использования торфа, угля и сапропелей в производстве аглопорита. При этом лабораторные испытания проводились на суглинках месторождений «Ольшанка», «Фанипольское», «Гайдуковка» и торфе ОАО «ТБЗ Усяж», ОАО «ТБЗ Старобинский».

5. Определены составы сырьевой смеси, физико-механические свойства торфа, химический состав суглинков, а также качественные показатели готовой продукции по зерновому составу и прочности, позволяющие уменьшить до 10 % энергозатраты при производстве ПСМ, а также улучшить критерии рациональности, комплексности и безотходности.

Список цитированных источников

1. **Карабанов, А.К.** Институту природопользования национальной академии наук Беларуси – 80 лет: основные направления и важнейшие результаты научно-исследовательской деятельности за последнее десятилетие / А.К. Карабанов, Г.А. Камышенко // Природопользование. – 2012. – Выпуск 22. – С. 5-17.
2. Государственная научно-техническая программа: «Природные ресурсы и окружающая среда»: первые результаты / И.И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2012. – Выпуск 22. – С. 188-195.
3. Торф – государственная программа на 2008-2011 годы и на период до 2020 года. – Минск, 2008. – 140 с.
4. **Березовский, Н.И.** Добыча и переработка горных пород. Осадочные горные породы / Н.И. Березовский, Б.А. Богатов. – Минск: БНТУ, 2005. – 138 с.
5. **Березовский, Н.И.** Природные ресурсы и их использование / Н.И. Березовский, Е.К. Костюкевич. – Минск: БНТУ, 2005. – 188 с.
6. **Березовский, Н.И.** Разработка энергоэффективных технологий / Н.И. Березовский. – Минск: БИП-С Плюс, 2006. – 219 с.
7. Использование местных видов топлива (МВТ) и ВТЭР в производстве пористых строительных материалов: монография / Н.И. Березовский [и др.]. – Минск: БИП, 2014. – 120 с.

Berezovsky N.I., Lesun B.V.

Efficient use of local fuels and secondary energy resources

Currently, there is an interest in local natural resources, where considerable place is devoted to peat deposits. The article considers the options for effective use of energy from organic materials and structure of consumption of peat fuel in the Republic of Belarus. The basic physical, technical and chemical characteristics of the main types of peat that can be used in production of porous building materials are also described. Substantiation of technological parameters and physical and mechanical properties of raw materials that are used in technological processes in production of open-textured building materials is given. The concepts of criteria of completeness and comprehensiveness of the use of resources have been introduced.

Поступила в редакцию 13.05.2016 г.

УДК 661.61.012-431(045)(476)

РЕЗЕРВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРИСТОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Березовский Н.И., Воронова Н.П., Костюкевич Е.К., Костюкевич И.Г.
(Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В работе представлена математическая модель для оптимизации теплотехнологических процессов сушки и обжига пористого керамического кирпича с учетом термических напряжений, на основании которой разработана методика определения рекомендаций по изменению интервалов режимных параметров производства с целью повышения эффективности использования ресурсов.

Введение

В настоящее время имеется множество примеров успешного введения в шихту для изготовления керамического кирпича различных промышленных отходов. Традиционно для улучшения сушильных свойств сырья для производства пористого керамического кирпича применяются отощители: опилки, лом торфобрикетов, шамот, шлак и другие отходы различных производств. Известно, что основная часть такого сырья, применяемого для производства керамического кирпича, обладает высокой чувствительностью к термической обработке, т.к. при его нагревании в период изготовления продукции происходят сложные физико-химические и химические процессы. В этой связи весьма важной задачей является обеспечение оптимальных режимов сушки и обжига с целью получения высококачественных изделий за минимальное время при минимальных затратах тепловой и электрической энергии. Решение таких задач возможно с использованием методов математического моделирования.

Разработка математической модели для оптимизации процесса сушки, обжига пористого керамического кирпича

На современном этапе система автоматического управления объектами с сосредоточенными параметрами, и особенно линейными объектами, уже относительно хорошо изучена. Однако в большинстве технических предложений суть объектов управления такова, что описание их небольшим конечным набором сосредоточенных переменных не адекватно ни сущности процесса, ни той цели управления, которая поставлена применительно к объекту.

В настоящее время актуальной является проблема оптимальности управляемости процессов с распределенными параметрами. Ряд работ посвящен важной задаче экономичного нагрева в различных технологических процессах. Однако разработок, посвященных анализу управления теплотехническими процессами с учетом термонапряжений, недостаточно.

При нагреве, сушке и обжиге тел возникают внутренние температурные напряжения, которые могут ограничивать скорость нагрева, особенно в начальной низкотемпературной стадии. Процесс нагрева должен проводиться таким образом, чтобы термонапряжения не превышали максимально допустимые значения с точки зрения появления различных микродефектов, а также не способствовали возможности разрушения тела. В частности, при решении задач оптимального по быстродействию нагрева кера-

мических тел необходимо учитывать не только управляющее воздействие, т.е. температуру греющей среды, но и ограничения на фазовые координаты (термонапряжения). Решение задачи оптимального по быстродействию нагрева при обжиге керамических стеновых материалов с учетом ограничений на термонапряжения гораздо сложнее, чем без учета этих ограничений [1, 2].

Применяя метод, позволяющий ограничения на фазовые координаты заменить ограничениями на управляющее воздействие, упрощается выбор допустимой скорости нагрева, в частности, при решении задач оптимального управления [3].

Рассмотрим теплотехнический процесс, описываемый системой:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(l, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 u(l, \varphi)}{\partial l^2}; \\ \left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_{l=1} = Bi [Q(\varphi) - u(1, \varphi)]; \\ \left. \frac{\partial u}{\partial l} \right|_{l=-1} = Bi [Q(\varphi) - u(-1, \varphi)]; u(l; 0) = v; \\ -(1 - \chi) \leq Q(\varphi) \leq 1 + \chi, \end{cases} \quad (1)$$

где $u(l, \varphi)$ – безразмерная температура;

l – безразмерная толщина, $l = x/s$, $(-1 \leq l \leq 1)$;

φ – безразмерное время, $\varphi = at/s^2$;

Bi – критерий Био, $Bi = \alpha s/\lambda$;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде;

λ – коэффициент теплопроводности материала тела;

s – толщина тела;

$Q(\varphi)$ – температура греющей среды;

v – безразмерная начальная температура;

χ – критерий несимметричности нагрева, $|\chi| < 1$.

Система (1) описывает процесс нагрева тела толщиной $2s$, для которого a , λ , α – соответственно коэффициенты температуропроводности, теплопроводности материала и теплообмена.

Распределение температурных напряжений в теле приводит к максимальным растягивающим $\sigma_{\max}$ и сжимающим $\sigma_{\min}$ напряжениям в виде

$$\sigma_{\max \min} = \frac{\beta E}{1 - \Theta} \frac{s}{3} \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=s} f(\mu), \quad (2)$$

где β – коэффициент линейного расширения;

E – модуль упругости;

Θ – коэффициент Пуассона;

$f(\mu)$ – функция от коэффициента несимметричности нагрева, $\mu = (s + c)/2s$, $c = \text{const}$, которая при нагреве постоянным тепловым потоком в регулярном режиме дает параболическое распределение температуры по толщине пластины

$$u(x, t) = c(t) + c_1(x + c)^2, \quad (3)$$

где $c(t)$ – линейная функция времени;

$c_1 = \text{const}$.

Функция $f(\mu)$ определяется следующим образом:

$$f(\mu) = \begin{cases} \left\{ 3(\mu-1) + \frac{1}{\mu}, \mu < 1; \right. \\ \left. 3 - \frac{2}{\mu}, \mu \geq 1; \right\} & \text{для } \sigma_{\max} \\ \left\{ 3 - \frac{2}{\mu}, \mu < 0,5; \right. \\ \left. \frac{1}{\mu} - 3, \mu \geq 0,5. \right\} & \text{для } \sigma_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

Если при нагреве наиболее опасны растягивающие напряжения, то введем ограничение

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\max}^*, \quad (5)$$

где $\sigma_{\max}^*$ – предельно допустимое растягивающее напряжение.

На основании этого ограничения можно определить максимально допустимое значение теплового потока и, в свою очередь, по граничному условию задачи (1) – ограничение на температуру греющей среды

$$Q(t) = u(s, t) + \frac{c_m}{\alpha s f(\mu)}, \quad (6)$$

где c_m – коэффициент, зависящий только от материала нагреваемого тела,
 $c_m = \frac{3\lambda(1-\Theta)\sigma_{\max}^*}{\beta E}$.

В регулярном режиме нагрева можно через внешний теплообмен судить о температурных напряжениях в теле.

Практическое применение формулы (6) позволяет при ограничении на температуру греющей среды

$$Q(\mu) \leq A = \text{const} \quad (7)$$

в начальной стадии нагрева, когда растягивающие термонапряжения не достигли максимально допустимой величины, ограничиться только ими. Начиная с момента времени t_1 , когда $\sigma_{\max}(t_1) \leq \sigma_{\max}^*$, необходимо кроме ограничения (7) учитывать и ограничение (6). Момент времени t_1 определяется из условия

$$u(s, t_1) = u_0 + \Delta u_{\max}, \quad (8)$$

где u_0 – начальная температура;

$\Delta u_{\max}$ – максимально допустимый перепад температур по толщине пластины с точки зрения допустимых термонапряжений.

Величину $\Delta u_{\max}$ можно найти по формуле

$$\sigma_{\max}^* = \frac{\beta E}{1-\Theta} \frac{\Delta u_{\max}}{3} \frac{f(\mu)}{\mu^2}. \quad (9)$$

Если $\min u(x, t) \geq \delta$; $-s \leq x \leq s$, где δ – температура, при которой материал имеет достаточную пластичность для погашения термонапряжений, то можно учитывать только ограничения.

Момент времени t_2 , когда ограничение (7) теряет силу, может быть определен по выражению

$$u(s, t_2) = \delta + \Delta u_{\max}. \quad (10)$$

Отсюда следует, что для выполнения ограничений на внутренние термонапряжения $\sigma_{\max}$ при использовании соотношения (7) необходимо знать температуру поверхности пластины $u(s, t)$ из системы (1). Тогда определяются моменты времени t_1 и t_2 , между которыми должно быть выполнено ограничение (7), использующее также текущее значение температуры поверхности $u(s, t)$; $t_1 \leq t \leq t_2$.

Рассмотрим численную реализацию задачи с применением решения смешанной задачи для уравнения упругих колебаний

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}; \quad 0 < x < b; \quad 0 < t < T, \quad (11)$$

где u – величина отклонения от стационарного положения;

c, a – коэффициенты, характеризующие состояние объекта в момент времени t с координатой x ;

T – время процесса.

Для того чтобы полностью определить существо процесса, необходимо задать начальные и граничные условия. В качестве начальных условий возьмем начальное отклонение и начальную скорость:

$$u(x, 0) = f(x); \quad \frac{\partial u}{\partial t} = g(x). \quad (12)$$

Граничные условия определяют режим изменений на концах объекта:

$$u(0, t) = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(0, t) = 0; \quad u(b, t) = 0; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(b, t) = 0. \quad (13)$$

Решение задачи удобнее проводить с помощью безразмерных переменных. Произведем замену $x \rightarrow x\sqrt{b}$; $t \rightarrow \frac{1}{c}t$, тогда решение производится на отрезке $[0; 1]$ и уравнение (11) примет вид

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial^4 u}{\partial x^4}. \quad (14)$$

Решение задачи (11)-(13) осуществим методом сеток, для этого введем две вспомогательные функции $v(x, t)$ и $\omega(x, t)$ по формулам:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{и} \quad \omega = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (15)$$

Уравнение (11) заменяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \end{cases} \quad (16)$$

Дополним систему (16) начальными и граничными условиями:

$$v(x, 0) = g(x); \quad \omega(x, 0) = f''(x); \quad (17)$$

$$v(0, t) = 0; \quad \omega(0, t) = 0; \quad v(1, t) = 0; \quad \omega(1, t) = 0. \quad (18)$$

Если задача (16)-(18) решена, то решение задачи (11)-(13) находится по формуле

$$u(x, t) = f(x) + \int_0^t v(x, t) dt. \quad (19)$$

Частные производные по x будем аппроксимировать их полусуммой центральных разностных производных на слоях j и $j+1$:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{j-1}^{j+1} - 2v_i^{j+1} + v_{i+1}^{j+1}}{h^2} + \frac{v_{i-1}^j - 2v_i^j + v_{i+1}^j}{h^2} \right); \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_{j-1}^{j+1} - 2\omega_i^{j+1} + \omega_{i+1}^{j+1}}{h^2} + \frac{\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j}{h^2} \right). \quad (21)$$

В частности, получаем систему (7) в разностном виде:

$$\begin{cases} \frac{v^{j+1} - v^j}{\tau} = \frac{(\omega_{i-1}^{j+1} - 2\omega_i^{j+1} + \omega_{i+1}^{j+1}) + (\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j)}{2h^2}; \\ \frac{\omega^{j+1} - \omega^j}{\tau} = \frac{(v_{i-1}^{j+1} - 2v_i^{j+1} + v_{i+1}^{j+1}) + (v_{i-1}^j - 2v_i^j + v_{i+1}^j)}{2h^2}. \end{cases} \quad (22)$$

Система (22) относится к классу неявных и аппроксимирует решение исходной задачи с точностью $O(\tau^2 + h^2)$. Она устойчива при любых соотношениях между τ и h .

Для решения системы (22) рассмотрим вектор

$$Z_i^{j+1} = \begin{pmatrix} v_i^{j+1} \\ \omega_i^{j+1} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Тогда система примет вид

$$-A_i Z_{i-1}^{j+1} + B_i Z_i^{j+1} - C_{i+1} Z_{i+1}^{j+1} = D_i, \quad i = 1, \overline{n-1}, \quad (24)$$

где

$$A_i = C_i = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\tau}{2h^2} \\ \frac{\tau}{2h^2} & 0 \end{pmatrix}, \quad B_i = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\tau}{2h^2} \\ \frac{\tau}{2h^2} & 0 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

$$D_i = \begin{pmatrix} \nu_i - \frac{\tau}{2h^2}(\omega_{i-1}^j - 2\omega_i^j + \omega_{i+1}^j) \\ \omega_i + \frac{\tau}{2h^2}(\nu_{i-1}^j - 2\nu_i^j + \nu_{i+1}^j) \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Из начальных условий определяется вектор Z_i^0 на нулевом временном слое. Решив систему (24), получим значение векторов Z_i^1 , а по формулам (19) – значение функции u_i^1 . Продвигаясь на второй временной слой и далее, получим решение задачи на всем промежутке $[0; T]$. Решение системы (24) осуществляется методом матричной прогонки. Сначала определяется вспомогательный набор двумерных матриц E_i и векторов F_i по рекуррентным формулам:

$$E_0 = 0, F_0 = 0; \quad (27)$$

$$E_i = (B_i - C_i E_{i-1})^{-1} A_i; \quad (28)$$

$$F_i = (B_i - C_i E_{i-1})^{-1} (D_i - C_i F_{i-1}), i = 1, 2, \dots, n-1. \quad (29)$$

Далее находятся искомые величины

$$Z_{i-1}^{j+1} = E_i Z_i^{j+1} + F_i, i = n-1; n-2, \dots, 1. \quad (30)$$

Описанный алгоритм решения задачи реализован специальной программой.

Для системы (30) поставим задачу: найти управление, удовлетворяющее системе, которое обеспечило бы минимальное время φ_0 выполнения равенства $u(l, \varphi_0) = 0$ для всех $-1 \leq l \leq 1$. Эта задача решается при помощи метода моментов. Решение конечномерной проблемы моментов сведено к определению чисел $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{k-1}, \varphi_0$, где Θ_i – точка переключения $Q(\varphi)$ из системы k трансцендентных уравнений с k неизвестными. Для $k = 2$ эта система имеет вид

$$2e^{\mu_i^2 \Theta_i} + (\chi - 1)e^{\mu_i^2 \varphi_0} = 1 + \chi + \nu, i = 1, 2, \quad (31)$$

где числа $\mu_i, i = 1, 2$ являются различными действительными положительными корнями характеристического уравнения

$$\frac{1}{Bi} \mu = \operatorname{ctg} \mu. \quad (32)$$

При решении задачи о нагреве функция $u(\varphi)$ на отрезке $[0; \Theta_1]$ должна принимать значения $1 + \chi$, а, следовательно, на отрезке $[\Theta_1; \varphi_0]$ она имеет значение $1 - \chi$.

Зададим начальное управление $Q(\varphi)$ в интервале $\Theta' \leq \varphi \leq \Theta''$, где $0 \leq \Theta' < \Theta'' < \Theta_1$. Благодаря правильному выбору этого управления можно выполнить ограничения на термонапряжения. В этом случае оптимальное управление существует и величины Θ_1 и φ_0 определяются из системы уравнений:

$$2e^{\mu_i^2 \Theta_1} + (\chi - 1)e^{\mu_i^2 \varphi_0} = \nu + (1 + \chi)e^{\mu_i^2 \Theta''} - \mu_i^2 s_i, i = 1, 2, \quad (33)$$

где

$$s_i = \int_0^{\Theta'} (1 + \chi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi + \int_{\Theta'}^{\Theta''} Q(\varphi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi. \quad (34)$$

Решение данной системы получим из соотношений:

$$\left(\frac{2e^{\mu_1^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_1)}{1 - \chi} \right)^{\mu_2^2} = \left(\frac{2e^{\mu_2^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_2)}{1 - \chi} \right)^{\mu_1^2}; \quad (35)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{\mu_1^2} \ln \left(\frac{2e^{\mu_2^2 \Theta_1} - (1 + \chi + \nu_1)}{1 - \chi} \right), \quad (36)$$

где

$$\nu_i = \nu + (1 + \chi) \left(e^{\mu_i^2 \Theta''} - e^{\mu_i^2 \Theta'} \right) - \mu_i^2 \int_{\Theta'}^{\Theta''} Q(\varphi) e^{\mu_i^2 \varphi} d\varphi, \quad i = 1, 2.$$

Если принудительное управление является линейной функцией, т.е. $Q(\varphi) = d + g\varphi$, $\Theta' \leq \varphi \leq \Theta''$, то значения Θ_1 и φ_0 определяются из соотношения

$$\nu_i = \nu + e^{\mu_i^2 \Theta''} \left[1 + \chi - d - g \left(\Theta'' - \frac{1}{\mu_i^2} \right) \right] - e^{\mu_i^2 \Theta'} \left[1 + \chi - d - g \left(\Theta' - \frac{1}{\mu_i^2} \right) \right], \quad (37)$$

где $d, g = \text{const.}$

Следовательно, используя прием для замены ограничения на фазовую координату ограничением на управляющее воздействие, приходим к тому, что метод решения задачи оптимального по быстродействию нагрева термически массивного тела с учетом ограничений на термонапряжения принципиально не отличается от метода решения той же задачи без учета ограничений на термонапряжения.

Заключение

С учетом предложенной математической модели для оптимизации теплотехнологических процессов сушки и обжига пористого керамического кирпича с учетом термических напряжений разработана методика, в соответствии с которой рекомендуется в начальный период процесса (до 150 °С с оптимальным расчетным временем $t_1 = 2$ ч) увеличивать скорости газового потока при скорости повышения температуры 75 °С/ч, при этом расчетный период температур по толщине составил 25 °С, что обеспечивает качественный нагрев материала. В интервале температур 150 °С–300 °С скорость подъема температуры теплоносителя рекомендуется не более 33 °С/ч (это связано с тем, что при этих температурах происходит максимальная усадка материала и оптимальное расчетное время составило $t_2 = 4,5$ ч). В интервале от 300 °С до максимальных температур (900–1000 °С) допустимая скорость подъема температуры в соответствии с вычисленным оптимальным временем процесса составляет 150 °С/ч. При максимальной температуре обжига керамические стеновые материалы рекомендуется выдерживать с целью выравнивания температуры по толщине и равномерного распределения минимального необходимого количества жидкой фазы для образования связки между дегидратированными, декарбонезированными частицами и зёрнами кварца.

Список цитированных источников

1. **Воронова, Н.П.** Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.
 2. **Воронова, Н.П.** Математическое моделирование и управление теплотехнологиями промышленных производств: монография / Н.П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2009. – 260 с.
 3. Методы лабораторного исследования и компьютерного моделирования процессов тепло- и массопереноса, формирования напряженно-деформированного состояния в природных дисперсных средах / Г.П. Бровка [и др.] // Природопользование. – 2012. – Вып. 22. – С. 97-108.
-

Berezovsky N.I., Voronova N.P., Kostukevich H.K., Kostukevich I.G.

Reserve increase efficiency in resource production of porous ceramic bricks

The article presents a mathematical model for process optimization of thermal drying and firing of open-textured ceramic bricks taking thermal stresses into account. On the basis of the mathematical model the method of determining of recommendations for change of operating parameters' intervals of production with the aim of increasing of the efficiency of resources use.

Поступила в редакцию 13.05.2016 г.

УДК 622.363.2, 551.49

ПЕТРИКОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ (СЕВЕРНЫЙ УЧАСТОК) И ЕГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ

Барбиков Д.В. (ОАО «Беларуськалий», г. Солигорск, Беларусь), Кацемба С.Н. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь), Курлович Д.М. (УО «Белорусский государственный университет», г. Минск, Беларусь)

В статье предложен обзор гидрогеологических исследований, проведенных на протяжении многих десятков лет на территории Северного участка Петриковского месторождения, результаты которых не потеряли своей актуальности и широкого использования в настоящее время при проектировании и строительстве Петриковского горно-обогатительного комбината (ГОК).

Введение

Настоящий обзор изучения гидрогеологических условий Северного участка Петриковского месторождения, на территории которого в ближайшее время планируется добыча калийных солей подземным способом, включает геолого-гидрогеологические исследования, проведенные в разные годы и разными организациями, и имеющие разноцелевые направления, к которым относятся: поисково-съемочные работы разных масштабов, геологоразведочные работы на поиски и разведку твердых полезных ископаемых, подземных вод, нефти и газа, инженерно-геологические изыскания под промышленное строительство, научно-исследовательские работы и т.д.

В основные задачи таких гидрогеологических исследований входило:

- рекогносцировочное обследование территории, в том числе обследование колодцев, поверхностных водотоков, замеры уровней, отбор проб поверхностной и подземной воды;
- полевое гидрогеологическое изучение водоносных (слабоводоносных) и водопорных локально водоносных (слабоводоносных) горизонтов и комплексов (бурение скважин, проведение в них опытно-фильтрационных работ (ОФР), замеры уровней, отбор проб подземной воды и образцов горных пород на лабораторное исследование поровых вод и водных вытяжек из керна геологоразведочных скважин и т.д.);
- камеральная обработка полевых материалов и лабораторных результатов (определение гидрогеологических параметров (коэффициентов фильтрации, водопроводимости, уровне- и пьезопроводности, радиусов влияния), определение химического состава воды и ее агрессивности и т.д.), составление листов ОФР (откачек), построение геолого-гидрогеологических карт и разрезов, а также многое другое.

Краткий физико-географический очерк района исследований

В административном отношении Северный участок Петриковского месторождения находится на территории Петриковского района Гомельской области, преимущественно в долинах рек Припяти* и Бобрик** (рисунок).

* Река Припять – самый крупный по величине и водности приток реки Днепр;

** река Бобрик – наиболее крупный приток реки Припять в районе объекта исследований.



Рисунок. – Обзорная карта объекта исследований

В геоморфологическом отношении Северный участок Петриковского месторождения расположен в пределах области Полесской низины, подобласти Белорусского Полесья, на стыке трех геоморфологических районов: Житковичская водно-ледниковая низина (северо-западная и западная части), Ветчинская водно-ледниковая низина с краевыми ледниковыми образованиями (северо-восточная часть) и Лунинецкая аллювиальная низина (южная и юго-восточная части) [1].

Основные черты рельефа Северного участка и сопредельных территорий преимущественно сформированы в эпоху среднего плейстоцена, в днепровскую стадию припятского оледенения.

Формирование долины р. Припяти, а также ее глубоких врезов и надпойменных террас, локально сохранившихся в настоящее время, происходило позднее, в верхнем плейстоцене, в период последнего поозерского оледенения.

Окончательное оформление морфологических черт долины р. Припяти произошло еще позже, уже в голоцене, тогда же и была сформирована долина р. Бобрик.

В то время в верхнем плейстоцене и голоцене на территории исследований происходило и интенсивное развитие эоловых процессов, в результате которых на земной поверхности образовывались эоловые холмы и гряды, сложенные рыхлым песчаным материалом, и поверхность приобретала волнистый облик (полого-волнистый рельеф).

Абсолютные отметки на территории исследований в настоящее время варьируют от 116,7 м (урез р. Припяти в районе г. Петрикова) до 150,0 м (холмы южнее и юго-восточнее промышленной площадки Петриковского ГОК).

Исследуемая территория весьма слабо расчленена по вертикали, и разность между абсолютными отметками составляет не более 2,0-3,0 м на квадратный километр. В то же время расчленение территории по горизонтали имеет более значительные показатели – длина эрозионных форм, сформированных постоянными и временными водотоками, изменяется от 1,0 км до 1,4 км на квадратный километр [1].

Непосредственно объект исследований расположен на левобережье р. Припяти и право- и левобережье р. Бобрик. Долина р. Припяти до устья р. Бобрик выражена не четко, а от устья р. Бобрик долина и пойма практически совсем не выражены.

Пойма р. Припяти широкая и двухсторонняя, ширина ее достигает более 8,0 км, русло извилистое и довольно разветвленное. Поверхность водосбора реки ровная, заболоченная, пересечена множеством староречий, озерами и протоками, дно ровное, песчаное или песчано-илистое. Скорость течения в межень период (в зависимости от глубины реки) колеблется от 0,2 м/с до 0,5 м/с. Разливы р. Припяти в половодье достигают в районе устья Бобрика 20,0 км.

Река Бобрик, протекающая по территории Северного участка Петриковского месторождения, берет свое начало в устье Озерного канала, находящегося на расстоянии 2,0 км северо-восточнее н.п. Копцевичи, впадает в р. Припять (оз. Старик) в районе н.п. Конковичи. Ее длина достигает 44,0 км, площадь водосбора составляет 710,0 км², средний уклон водной поверхности – 0,4 ‰. Основными притоками р. Бобрик являются мелиоративные каналы: Озерный (длиной 8,5 км), Переток (10,0 км) и Копцевичский (8,2 км), расположенные на правом берегу, и левые каналы: Озерный (длиной 7,2 км), Старище (8,2 км), Копцевичский (6,0 км) и Мехедово-Грабовский (25,0 км). В последний слева впадают каналы: Копцевичский и Мехедовичский длиной 6,4 и 9,3 км соответственно.

Водосбор р. Бобрик имеет грушевидную форму и более развит по левобережью. Долина реки трапецеидальная, склоны пологие и бугристые, высотой 5,0-7,0 м, изредка достигают 15,0 м. Русло реки свободно меандрирующее (коэффициент извилистости составляет 1,09) и на протяжении 40,7 км все канализовано.

Пойма реки на большей части не ясно выраженная и представляет собой осушенное болото, сильно пересеченное старицами и осушительными мелиоративными канавами.

Сложена пойма аллювиальными, озерными и болотными отложениями, представленными, в основном, песками, песчано-гравийными породами, супесями, суглинками, глинами, торфом, реже илом, местами в пойме встречаются невысокие песчаные гряды и холмы.

В половодье пойма затопляется на глубину от 0,2 м до 1,0 м, сроком на 10-30 дней, подъем уровня происходит около 30 суток, разливы воды иногда достигают 4,0-5,0 км. Самый низкий уровень воды наблюдается в сентябре-октябре и нарушается осенними дождевыми паводками.

Питание рек и каналов смешанное (снеговое, дождевое и грунтовое) с преобладанием снегового и осуществляется за счет поверхностной и подземной составляющих стока. Приток поверхностных вод происходит относительно быстро и наблюдается во время снеготаяния и выпадения дождей.

Подземное питание постоянное и замедленное, зависит от глубины вреза русла относительно залегания уровня подземных вод.

Режим стока в годовом разрезе характеризуется высоким продолжительным весенним половодьем, относительно низкой меженью и периодическими летними и осенними паводками. На период весеннего половодья приходится 60 %, летне-осенней межени – 24 %, зимней – 16 % годового стока. Средний многолетний модуль стока в районе исследований составляет в среднем $4,3 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$.

Согласно почвенно-географическому районированию Северный участок Петриковского месторождения расположен в Любанско-Светлогорско-Калинковичском подрайоне дерново-подзолистых заболоченных песчаных, супесчаных и торфяно-болотных почв низинного типа [2].

По степени увлажнения в большей степени развиты полугидроморфные почвы, в меньшей – автоморфные и гидроморфные.

Район Петриковского месторождения характеризуется умеренным, переходным от морского к континентальному климатом.

Средняя годовая температура воздуха по многолетним данным в районе Северного участка составляет $7,0^\circ\text{C}$ (метеостанция Житковичи).

В целом, на объекте исследований, как и на территории всей Беларуси, наиболее распространены ветры западного направления, в зимнее время присутствуют юго-западные ветры, а летом преобладают западные и северо-западные. Средняя годовая скорость ветра (метеостанция Житковичи) составляет 2,5 м/с.

Характерной чертой атмосферной циркуляции является частая смена циклонов и антициклонов, которая и приводит к неустойчивости погоды в Беларуси.

Влажность воздуха в течение всего года высокая. В годовом разрезе относительная влажность составляет 78 %, в осенне-зимний период – 78-88 %, весной и летом понижается до 66-77 %.

Изучаемый район относится к зоне достаточного увлажнения. Среднее годовое количество осадков составляет 684 мм (метеостанция Житковичи).

Месячные суммы осадков имеют четко выраженный годовой ход с минимумом в феврале-марте и максимумом в летние месяцы. Наиболее часто осадки выпадают зимой и осенью, но объем выпавших осадков летом значительно больше, чем зимой (апрель-октябрь месяцы – 465 мм, ноябрь-март – 219 мм).

Сейсмичность территории исследований. В Петриковском районе за весь период наблюдений не зафиксировано ни одного землетрясения.

Экономическая освоенность района исследований. Ведущей отраслью, в которой занято население, является сельское хозяйство и незначительный процент приходится на предприятия местной промышленности.

Гидрогеологическая изученность Северного участка Петриковского месторождения калийных солей

В свое время, в 40-70-е годы прошлого столетия согласно долговременной производственной программе СССР, предусматривающей широкое проведение мелиора-

ции земель, обеспечивающей устойчивое и динамичное развитие сельскохозяйственного производства и четкое взаимодействие отраслей агропромышленного комплекса по наращиванию производства сельскохозяйственной продукции, особое внимание в стране уделялось территориям, находящимся в условиях неблагоприятного водного режима.

К таким территориям, попадающим под государственное требование рационального использования природных ресурсов в увязке с народно-хозяйственными планами, и намеченным в ближайший период и в перспективе к мелиорированию, однозначно относились избыточно переувлажненные земли Белорусского Полесья.

И поскольку рост урожайности оставался важнейшей проблемой в советском государстве, на территориях, в нашем случае с избыточным увлажнением и неиспользуемых по этой причине в сельском хозяйстве, широким фронтом развернулись геолого-гидрогеологические съемочные работы, приобретая в дальнейшем еще более широкий размах.

Здесь следует заметить, что в это время и несколько раньше на территории бывшего СССР разворачиваются планомерные съемочные работы в целях геологического картирования территорий, и съемка приобретает комплексный характер исследований.

При проведении съемочных работ изучаются и отражаются на картах все стороны геологического строения в широком смысле слова, т.е. учитываются геоморфологические, гидрологические, геологические, гидрогеологические, геофизические и другие наблюдения, а поиски проводятся различными методами и освещаются всесторонне.

В 1947 году, несмотря на послевоенные разруху и голод, в пределах среднего течения р. Припяти (лист (Петриков)) была выполнена первая (после войны) гидрогеологическая съемка масштаба 1:200000, по результатам которой на правом берегу были выявлены выходы минерализованных вод.

Далее, в 50-е годы на исследуемой территории проводились многочисленные съемочные гидрогеологические и инженерно-геологические работы масштабов 1:50000 и 1:100000, которые в связи с их целенаправленностью сводились, в основном, к изучению водоносных горизонтов кайнозойских отложений, преимущественно четвертичных и неогеновых, развитых в верхней части геологического разреза и повсеместно распространенных на территории исследований.

Основные результаты съемочных гидрогеологических и инженерно-геологических исследований, выполненных на изучаемой территории, содержались в следующих нижеперечисленных работах.

В 1953 году были выпущены два отчета о результатах проведенных комплексных геолого-гидрогеологических съемок в масштабе 1:50000 и инженерно-геологических исследованиях на территории левобережья р. Припяти, между низовьями р. Цны и р. Бобрик и на территории средней и нижней частях бассейна р. Птичи.

В 1954 году вышел отчет о результатах комплексной геолого-гидрогеологической съемки в масштабе 1:50000 и инженерно-геологических исследованиях, проведенных на территории бассейна р. Припяти, в верховьях и среднем течении р. Случи и р. Птичи.

В 1958 году представлены результаты комплексной геолого-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:100000 и 1:50000 для целей осушения и гидротехнического строительства на территории р. Уборти.

Начиная с 50-х годов двадцатого столетия, большое значение в республике уделяется хозяйственно-питьевому обеспечению населения, объектов промышленности и сельского хозяйства подземной водой.

Полагаясь на данные кадастра «Подземные воды СССР», «Буровые на воду скважины», выпущенного в 1976 году (г. Москва), уже в 1952, 1953, 1956, 1957 годах пробурены первые одиночные водозаборные скважины в населенных пунктах: Петриков, Копцевичи и Слобода.

В дальнейшем водоснабжение территории осуществлялось, в основном, посредством колодцев и одиночных водозаборных скважин, эксплуатирующих водоносные горизонты четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложений. Но широкое распространение бурения водозаборных эксплуатационных скважин для хозяйственно-питьевого водоснабжения пришлось на 60-е, начало 70-х годов.

Гидрогеологическое изучение более глубоких горизонтов геолого-литологического разреза Северного участка Петриковского месторождения можно отнести к 1961 году, когда были получены (был выпущен отчет З.Л. Познякевич и др.) результаты глубокого бурения на Шестовичской и Петриковской площадях, и закрыты некоторые вопросы по стратиграфии и литологии Припятской впадины, а также получены результаты гидрогеологического опробования средне-верхнедевонского (подсолевого) терригенно-карбонатного комплекса.

В 60-е годы и первой половине 70-х годов проводятся геологоразведочные работы на предмет оценки запасов калийных солей, и в 1969 году уже представлен отчет И.И. Зеленцова и др. о результатах предварительной разведки Северного участка Петриковского месторождения калийных солей Петриковского района Гомельской области БССР с подсчетом запасов калийных солей по категориям C_1 и C_2 по состоянию на 1 июня 1969 г., с результатами гидрогеологического опробования верхнедевонских отложений, выполненного в 1968 и 1969 годах.

Кроме того, в 60-е и 70-е годы резко возобновилось изучение Припятского Полесья, связанное с вопросами мелиорации, повлекшее за собой продолжение съемочных изысканий. И в 1970 году сдан отчет о результатах комплексных геолого-гидрогеологических съемочных работ в масштабе 1:50000 и инженерно-геологических исследованиях по водосборам рек Горыни, Ствиги, Уборти и Птичи.

Большой и неоценимый вклад в изучение Белорусского Полесья внес доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологических проблем Института геохимии и геофизики АН БССР М.Ф. Козлов, который в свое время сумел обобщить результаты ранее проведенных поисковых, съемочных и разведочных работ.

Эти обобщающие исследовательские работы академического профиля характеризовали всю обширную территорию Белорусского Полесья и являлись несомненно выдающимся достижением тех лет и настоящего времени, создание которых было затруднено тем, что участки (площади) съемок разных масштабов были изолированы друг от друга, и результаты в некоторых случаях были трудно сопоставимы.

В 1970 году М.Ф. Козлов, В.П. Васильев, Я.М. Шилинская на основе накопленного фактического материала инженерно-геологических исследований, комплексных геологических и гидрогеологических съемок разных лет составили и издали специальные карты геоморфологической, геологической, гидрогеологической, гидрогеохимической (и другой) тематики в масштабе 1:500000, охватывающие огромную территорию республики Беларусь, которые впоследствии нашли свое применение (являлись опорными) при создании Национального Атласа Республики Беларусь.

В начале 70-х годов закончены оценочные геологоразведочные работы Северного и Южного участков Петриковского месторождения (предварительная разведка), и по их результатам выполнен подсчет запасов калийных солей по категориям C_1 и C_2 по состоянию на 1 октября 1971 года (И.И. Зеленцов, В.С. Плутенко, М.И. Швеи и др.).

Почти следом, спустя всего лишь 3 года, в 1974 году представлен 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 года (И.И. Зеленцов, А.А. Варламов и др.), который включал также и результаты гидрогеологических исследований меловых, юрских, нижнетриасовых, каменноугольных и верхнедевонских отложений.

Также при проведении геологоразведочных работ по подсчету запасов в 1972 году были обследованы поверхностные водоемы (реки Припять и Бобрик, их притоки, рукава, озера, старицы, родники, мелиоративные каналы и т.д.), и одновременно было выполнено обследование колодцев в г. Петрикове и населенных пунктах: Акрионы, Ацирки, Березняки, Вышелове, Голубице, Ильиче, Конковичи, Косище, Летовище, Макаричи, Мордвине, Оголичской Рудне, Осовце, Роге, Рубче, Свинки, Свободе, Снядене, Сметаничи, Сотничи.

В 1976 году под авторством Козлова М.Ф. издается книга «Гидрогеология Припятского Полесья», которая включает обобщение и анализ геолого-гидрогеологических материалов с элементами инженерной и четвертичной геологии района Припятского Полесья, рассчитанная на широкий круг специалистов и имеющая важное (уникальное) значение для дальнейшего изучения Полесья, а также практического применения [3].

К 1980 году были завершены поисково-разведочные работы с акцентом изучения водоносных горизонтов палеогеновых отложений, которые в достаточной степени характеризуют все водоносные горизонты, развитые в разрезе и распространенные на исследуемой территории. И в том же году сдан отчет (Ю.Т. Залиппа, А.С. Коломеец и др.) о результатах проведенных работ по выявлению и оценке эксплуатационных запасов подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Петрикова.

В 1982 году выпущен отчет о результатах гидрогеологических работ по разведке подземных минеральных вод для санатория-профилактория «Птичь» (п.г.т. Копаткевичи) Петриковского района Гомельской области.

В 1989 году организацией Союзбургаз представлены результаты разведки Конковичской площади в Гомельской области (М.П. Овчинников и др.), с данными единичного гидрогеологического опробования пермского карбонатно-терригенного комплекса в восточной части территории исследований.

В 1993 году в Институте геологии, геохимии и геофизики Академии наук Беларуси А.В. Кудельским, Т.Д. Кривецкой и учениками и последователями М.Ф. Козлова (А.М. Гречко и В.И. Пашкевичем) подготовлена и опубликована работа «Государственная экспертиза широкомасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья», в которой приводится накопленный фактический материал специальных исследований, проведенных на Лельчицком гидрогеологическом стационаре (Гомельская область), организованном по инициативе, принципам и под руководством М.Ф. Козлова, и излагаются результаты геолого-гидрогеологических оценок последствий осушительных мероприятий на Полесье [4].

В 2002 году на предприятии «Белкартография» издается Национальный атлас Республики Беларусь, содержащий карты различной природной тематики, в том числе и геолого-гидрогеологического направления, которые являются наследием изучения Белорусского Полесья и итогом достижения проведенных в свое время тематических исследований. В настоящее время данные карты широко используются при выполнении учебных, научных, исследовательских и производственных работ [5].

Уже говорилось о том, что проведенные геолого-съёмочные работы прошлых лет находят свое использование во многих последующих работах, в частности, их результаты учтены при проведении гидрогеологического и инженерно-геологического доизучения листов территории Житкович и Петрикова, выполненного в период 1995-2003 годов, в масштабе 1:200000 (В.П. Ермолаев, В.А. Зубок и др.).

В результате проведенных исследований, выполненных с большим объемом буровых и опытно-фильтрационных работ и охватывающих довольно значительную территорию, более чем в двух десятках гидрогеологических (поисковых и водозаборных) скважин, попадающих на нашу территорию, опробованы четвертичные, юрские, палеогеновые и триасовые отложения. Также в 1997-1998 годах обследованы реки Припять и

Бобрик, в 1997 году в населенных пунктах Бабуничи, Березняки, Куритичи, Мордвине обследованы колодцы.

В 2012 году возобновились геологоразведочные работы по доразведке запасов калийных солей Петриковского месторождения на Северном участке, и в том же году были представлены результаты их производства с переоценкой (подсчетом) запасов по состоянию на 01.01.2013 года (Н.В. Матыченкова, Л.Ф. Шемет и др.).

В рамках работ по доразведке Петриковского месторождения на Северном участке были пробурены четыре гидрогеологические скважины (две – в краевых частях и две – в центральной части), в которых проведены опытные работы на предмет исследования обводненности глинисто-мергелистой толщи верхнего девона.

В 2012-2013 годах для уточнения геолого-литологического разреза, изучения физико-механических, тепло- и водно-физических свойств горных пород (и других целей) на промплощадке Петриковского ГОК в центре сечения скипового и клетового шахтных стволов пробурены две контрольно-стволовые скважины, а в непосредственной близости от них, с целью изучения обводненности геологического разреза шахтных стволов, было пробурено пять гидрогеологических скважин на водоносные горизонты четвертичных, неогеновых, палеогеновых, меловых, юрских и девонских отложений.

В 2013 году ОАО «Белгорхимпром» была выполнена оценка воздействия на окружающую среду Северного участка Петриковского месторождения.

В рамках этой работы с целью построения схематической гидрогеологической карты глубины залегания первого от поверхности водоносного горизонта, необходимой для обоснования мер защиты земной поверхности от влияния подработки горными работами и прогноза подтопления местности, проведена рекогносцировка территории (В.В. Савченко, В.Е. Волков и др.), в которую входило обследование рек Припяти и Бобрик, а также исследование колодцев в населенных пунктах: Адаши, Березняки, Ильиче, Коржовке, Кулитичи, Людвинуво, Макаричи, Муляровке, Оголичах, Оголической Рудне, Першамае, Петрикове, Свинки, Слободе, Сметаничи, Сотничи, Средней Рудне и других.

В 2013 году результаты проведенных на территории Северного участка Петриковского месторождения геолого-гидрогеологических работ нашли свое отражение в следующих работах, выпущенных в ОАО «Белгорхимпром»:

- технико-экономическое обоснование постоянных кондиций для подсчета запасов калийных руд Петриковского месторождения (Северный участок) (отв. исполнитель С.Н. Цыганков);

- разработка исходных данных и основных технологических решений для разработки стадии Архитектурный проект, в т.ч. геологическая часть (отв. исполнители: В.Э. Кутырло, С.Ф. Савчик);

- разработка исходных данных и основных технологических решений для разработки стадии Архитектурный проект. Горная часть (отв. исполнитель С.Н. Цыганков);

- разработка исходных данных для проекта проходки шахтных стволов, в т.ч.: исходные данные по скиповому и клетовому стволам, включающие расчеты водопри токов при проходке скипового и клетового стволов, (отв. исполнитель В.Э. Кутырло).

В 2014 году на промплощадке Петриковского ГОК пробурено шесть гидрогеологических наблюдательных скважин, по две скважины внутри шахтных стволов (скипового и клетового) глубиной 84, 0 м и 202,0 м и две скважины между ними глубиной 83,5 м и 203,5 м на водоносные горизонты палеогеновых и юрско-сеноманских отложений (соответственно) для наблюдений за уровнем подземных вод в период проведения проходки шахтных стволов способом заморозки породного массива.

В 2012-2015 годах на территории Северного участка Петриковского месторождения в период проектирования и строительства Петриковского ГОК были проведены

инженерно-геологические изыскания по поверхностному комплексу, включая следующие основные проектируемые объекты: выбор места расположения промышленной площадки (изучено четыре участка), солеотвал и шламохранилище, водохранилище технической воды, бульдозерный отвал, установка закачки рассолов в горизонты-коллекторы, прокладка дорог, АБК (административно-бытовой комбинат) и другие (рук. договоров Савенок А.А.). В состав изысканий входило бурение верхней части четвертичного разреза, фиксация появления воды в разрезах скважин, замеры установившегося уровня, отбор проб подземных вод и грунта и прочее.

В 2016 году в рамках НИР «Провести исследование глинисто-мергелистой толщи выполнить районирование Северного участка Петриковского месторождения калийных солей по условиям водозащиты с учетом возможности приращения мощности ВЗТ» по результатам бурения и опробования геолого-поисковых, геологоразведочных, контрольно-стволовых, поисково- и разведочно-гидрогеологических, водозаборных, наблюдательных и инженерно-геологических скважин, а также по результатам обследования колодцев и поверхностных водотоков прошлых лет и настоящего времени выполнена оценка гидрогеологических и гидрогеохимических условий Северного участка Петриковского месторождения калийных солей (Кацемба С.Н. и др.).

Обработанные результаты разных лет и различного геолого-гидрогеологического содержания, на основании которых выполнялась оценка гидрогеологических условий территории исследований, представлены в отчете НИР в текстовом и табличном видах. Для наглядности НИР дополнена графическим материалом, включающем карты: фактического материала и изученности территории Северного участка Петриковского месторождения, а также прилегающих территорий; гидрогеологического и гидрогеохимического опробования зон активного и замедленного водообменов; геолого-гидрогеологические разрезы, характеризующие площадь исследований в геологическом и гидрогеологическом отношении; гидрогеологические карты распространения водоносных горизонтов четвертичных и дочетвертичных отложений на исследуемой территории.

Результаты названной НИР в комплексе с другими исследованиями будут использованы при создании математической модели и районировании территории по условиям водозащиты с целью определения возможности увеличения мощности ВЗТ за счет глинисто-мергелистой толщи на площадях распространения калийного горизонта IV-п, имеющих ограничения по условию водозащитных свойств и безопасной отработки полезного ископаемого.

Заключение

Проанализировав геолого-гидрогеологическую и инженерно-геологическую информацию прошлых лет и настоящего времени, можно сделать вывод, что в геологическом разрезе Северного участка Петриковского месторождения безусловно наиболее изученными являются мезо-кайнозойские отложения зоны активного водообмена, среди которых наибольшему исследованию подлежали грунтовые воды четвертичных отложений, в силу их близкого залегания к земной поверхности, и подземные воды палеогеновых пород, активное изучение которых связано с их эксплуатацией для хозяйственно-питьевых нужд г. Петрикова и района.

Разрез нижезалегających палеозойских отложений в восточной части Северного участка Петриковского месторождения исследован значительно слабее, а в восточной части он практически не изучен. В разрезе палеозойских отложений без сомнения большое внимание было уделено верхнедевонским надсолевым карбонатно-терригенным отложениям западной части Северного участка Петриковского месторож-

дения калийных солей, предпочтение которым отдавалось, как к потенциально обеспечивающим водозащиту Петриковского месторождения при его отработке.

Для простоты и удобства восприятия обзор гидрогеологических исследований, проведенных на территории Северного участка и сопредельных территориях, будет детальнее изложен в следующих выпусках журнала отдельно по подземным водам мезокайнозойской эратемы зоны активного водообмена и подземным водам палеозойской эратемы зоны замедленного (и весьма замедленного) водообмена.

Также в данный журнал будут предложены статьи по гидрогеохимической изученности, гидрогеологическим и гидрогеохимическим условиям Северного участка Петриковского месторождения, и в ближайшем будущем планируется представить сводную геолого-гидрогеологическую колонку Северного участка Петриковского месторождения в соответствии со схемой сопоставления стратиграфических подразделений, утвержденной Приказом Департамента по геологии Минприроды РБ № 49 от 22.09.2010 г. Методической основой составления колонки будет служить легенда сводной геолого-гидрогеологической колонки Старобинского месторождения, разработанной в 2004 году в рамках НИР «Правила по защите рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения» в ОАО «Белгорхимпром» (Кацемба С.Н., Злебова А.Е.), широко используемой при решении многих производственных и научно-исследовательских геологических и горных задач.

Список цитированных источников

1. **Якушко, О.Ф.** Геоморфология Беларуси / О.Ф. Якушко, Л.В. Марьина, Ю.Н. Емельянов. – Минск: БГУ, 2000. – 173 с.
2. Почвы СССР / Т.В. Афанасьева [и др.]. – М.: Мысль, 1979. – 374 с.
3. **Козлов, М.Ф.** Гидрогеология Припятского Полесья / М.Ф. Козлов. – Минск: Наука и техника, 1976. – 148 с.
4. Национальный атлас Республики Беларусь. – Минск: Белкартография, 2002. – 292 с.
5. Гидрогеологическая экспертиза широкомасштабных осушительных мелиораций Белорусского Полесья / А.В. Кудельский [и др.]. – Минск: «Навука і тэхніка», 1993. – 109 с.

Barbikov D.V., Katsemba S.N., Kurlovich D.M.

Petrikov deposit of potash salt (Northern prospect) and knowledge on it hydrogeology

The paper presents a scope of hydrogeological studies that have been carried out during dozens of years at Northern prospect of Petrikova potash salt deposit. The results of those studies have not lost their applicability and are being currently in use in designing and construction of Petrikov Mining and Processing Complex (MPC).

Поступила в редакцию 22.03.2016 г.

УДК 622.7.092(045)(476)

УСРЕДНЕНИЕ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ МЕСТНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

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

В настоящее время стоимость составляющих компонентов сырьевых смесей для производства пористых строительных материалов в несколько раз превышает стоимость фрезерного торфа и переработанных топливных брикетов, поэтому их замена носит актуальный характер и позволит в будущем использовать результаты исследования при импортозамещении различных видов угля. Рассмотрена эффективность усреднения сырьевых смесей на карьерных складах, которая может определяться общей дисперсией качества сырьевой смеси в отгружаемых со склада порциях смеси или критерием оптимальности.

Введение

Решение задач экономического и социального развития требует совершенствования технологических процессов в целях снижения энергоемкости производства и себестоимости продукции за счет использования местных видов топлива (МВТ) и вторичных энергетических ресурсов (ВТЭР) на основе фрезерного торфа, топливных брикетов, древесных опилок, лигнина, соломы и других видов. В технологии производства аглопорита и керамического кирпича в Республике Беларусь в настоящее время используют дорогостоящий импортный материал – антрацит или каменный уголь, который добывают на Украине.

Основными направлениями экономии энергоресурсов являются: совершенствование технологических процессов, оборудования, снижение потерь топливно-энергетических ресурсов, структурные изменения в технологии производства, улучшение качества топлива и энергии. Следует развивать производства, имеющие высокую долю местных ресурсов, а также более глубокую их переработку. Это производство стройматериалов, деревообработка, химическая и топливная отрасли. Республика Беларусь располагает сырьевыми топливными ресурсами торфа, продуктами его добычи и переработки (торф для брикетирования и пылевидного сжигания, брикеты, кусковой торф), бурого угля, нефти, горючих сланцев, дров. Торфяное топливо в настоящее время играет значительную роль в обеспечении потребности Республики Беларусь в твердом топливе, в первую очередь, в обеспечении потребности населения и коммунально-бытовых потребителей. В недрах Республики Беларусь имеются значительные запасы торфа, рациональное освоение которых может способствовать повышению эффективности в ряде отраслей экономики [1].

Внедрение научных разработок в производство позволит получить значительный экономический эффект за счет разницы цен составляющих сырьевой смеси и уменьшения энергозатрат при их сушке и обжиге. Для достижения этой цели следует развивать производства, имеющие высокую долю местных ресурсов, а также более глубокую их переработку.

Исследования по обогащению и усреднению сырьевых смесей

Для получения высококачественных, прочных и надежных строительных материалов необходимо подбирать и тщательно анализировать исходные компоненты с точки зрения рентабельности и ресурсосбережения. На карьере «Ольшанка» (Минский

район) при добыче силикатного песка, который используют для производства кирпича, значительное количество вскрышных пород поступало в отвалы (отходы), которые в последнее время утилизируются и используются для производства. Основным параметром оптимизации получаемой готовой продукции является ее плотность и прочность, которые зависят от эффективности смешивания или усреднения параметров сырьевой смеси. Смешивание малых объемов с весьма большими требует значительного времени усреднения в больших емкостях. Для того чтобы снизить расход времени, применяют последовательное смешивание увеличивающихся объемов [2, 3].

Если вещество 1 массой m_0 смешать с веществом 2 массой m_1 , где $m_1 \gg m_0$, то в результате получают смесь концентрации

$$p = \frac{m_0}{m_0 + m_1}. \quad (1)$$

Вещество 2 в количестве $m^{(1)} = m_0$ смешивают, получают концентрацию $p = m_0/(2m_0)$. Затем берут массу вещества 2 в количестве $m^{(2)} = 2m_0$ и смешивают с предыдущей смесью, получают концентрацию $p^{(2)} = m_0/(4m_0)$. В первой операции смешивания получают $p^{(i)} = m_0/(2^i m_0) = 1/2^i$. Так поступают до тех пор, пока $p^{(i)} = p_0$.

Необходимое количество операций смешивания находят по соотношению

$$i = -\frac{\ln p_0}{\ln 2}. \quad (2)$$

Перемешивание двух и более продуктов в соизмеримых пропорциях дает в результате новые показатели, которые являются средневзвешенными от ингредиентов.

Однако число i должно быть натуральным, поэтому в качестве i необходимо брать целую часть от правой части формулы, т.е.

$$i = \left\lfloor \frac{\ln p_0}{\ln 2} \right\rfloor. \quad (3)$$

Неудобством является и задаваемое значение концентрации, которое в соответствии с величиной $1/2^i$ может принимать лишь значения 50 %, 25 %, 12,5 %,

Предлагается к массе m_0 первого вещества при первом смешивании добавить массу m_0 второго вещества, при следующих смешиваниях добавлять второе вещество в соответствии с арифметической прогрессией в количестве km_0 , тогда p_i можно найти по формуле

$$p_i = \frac{m_0}{m_0 + m_0 + k \cdot (i-1) \cdot m_0} = \frac{1}{2 + k \cdot (i-1)} = p_0. \quad (4)$$

Отсюда
$$i = \frac{1 + (k-2) \cdot p_0}{k \cdot p_0}.$$

Так при заданной концентрации $p_0 = 0,1$, соответствующей 10 %, имеем

$$i = \frac{1 + (k-2) \cdot 0,1}{k \cdot 0,1} = \frac{8+k}{k}. \quad (5)$$

Так как величина i есть натуральное число, большее 1, то при выполнении условия $8+k = k \cdot i$ и $8 = k \cdot (i-1)$, k может принимать значение, равное 2, при этом $i = 5$, что означает, что смешивание происходит, добавляя вещество в количестве 2 единицы 5 раз, или же – в количестве 4 единицы 3 раза. В связи с использованием для про-

изводства аглопорита глинистого сырья месторождения «Фанипольское», физико-химические свойства которого не позволяют добиться требуемой скорости спекания и качества аглопорита при существующих технологических параметрах, возникла необходимость в совершенствовании технологии получения аглопорита и снижении энергозатрат на его производство.

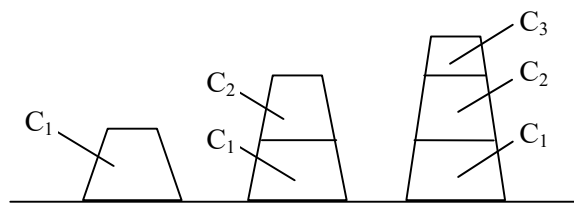
Опыт работы действующих предприятий, использующих в качестве технологического топлива низкосортные угли, а также результаты предварительных исследований по сжиганию углей с различным содержанием летучих в агломируемом слое, анализ технологических характеристик торфа позволяют рекомендовать проведение исследований и разработку технологических параметров производства пористых строительных материалов при замене угля МВТ. К МВТ при производстве легких заполнителей можно также отнести сапропели. Насчитывается большое количество озер, в которых процесс сапропелеобразования стал необратим. В этих условиях разработка сапропелей диктуется необходимостью сохранения водоемов. Поэтому, добыча носит промышленный характер, и применение сапропелей возможно не только в сельском хозяйстве, но и в производстве легких заполнителей. Предыдущими исследованиями [4] установлено, что при существующей системе загрузки шихты на агломерационную машину имеет место значительная неравномерность распределения шихты по крупности как по высоте слоя, так и по ширине паллет. Существенные отличия алюмосиликатного сырья и обусловленные ими отличия, проявляющиеся в процессе формирования аглопоритового спека, вызвали необходимость в поиске и исследовании новых путей совершенствования режима агломерации.

Использование имитационного моделирования при разработке критерия оптимизации обогащения сырьевой смеси

Для технологии усреднения сырьевых смесей, которые используются при производстве некоторых строительных материалов, важным моментом является классификация и определение основных свойств составляющих смесей, а также методы их использования. Качество сырьевых смесей, поступающих на технологическую переработку, далеко от стабильности.

Проведенные лабораторные и промышленные опыты при использовании фрезерного торфа ТБЗ «Усяж» (торф низинный $R = 25-30 \%$, $A^c = 18 \%$) и ТБЗ «Старобинский» участок «Слущкий» (торф верховой $R = 15 \%$, $A^c = 10 \%$, вид моховый) показали, что для стабилизации готовой продукции по плотности и прочности необходимо проводить усреднение сырьевой смеси (процентное содержание и влажность компонентов, гранулометрический состав и др.).

В производственных условиях наиболее удачными способами усреднения являются слоевой, реализуемый в штабелях, и конвейерный – варианты продольного сдвига. На их основе можно создавать эффективные усреднительные системы. Однако оба эти способа требуют изучения с помощью моделей, которые отличаются наибольшей глубиной исследования процессов перемешивания. При этом основную информацию дает анализ связи спектров функции качества сырья до и после его усреднения или амплитудно-частотной характеристики способа, которые показывают, как меняются колебания функции качества на разных частотах. Функцией качества являются, как правило, важные характеристики торфа – зольность и теплотворная способность. Аргументом функции качества предлагается масса m . Модели с функцией качества $K(m)$ не только более просты, но и более информативны. Это подтверждается построенной моделью слоевого штабеля (рисунок 1), слои которого формируются в одном направлении,



C_1 – уголь; C_2 – торф; C_3 – суглинок
Рисунок 1. – Схема слоевого штабеля
для 3-х компонентов

ного ассортимента, в состав которого входят уголь, суглинки, крошкообразный торф, возврат от производства аглопорита.

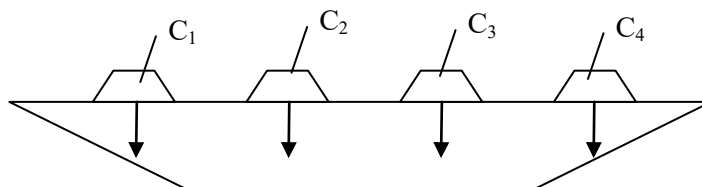
Анализ показал, что данная методика характерна для последовательного поэтапного применения этой технологии усреднения сырьевой смеси по схеме «слоевой штабель – разгрузка ячеек», что приводит к значительным энерго- и ресурсозатратам, т.к. применяются 2 схемы. Это характеризуется качеством сырья и его массой. На рисунке 3 представлена структура программного модуля усреднительного склада.

В настоящее время имитационное моделирование является одним из современных методов научного обеспечения исследований и прогнозирования последствий принимаемых решений. Оно в основном используется для совершенствования методов расчета технико-производственных показателей с учетом случайных факторов и состоит в многократном воспроизведении функционирования исследуемой системы на основе анализа математической модели. Результаты представляют собой выборки случайных величин, характеризующих функционирование исследуемой системы. Имитационное моделирование как статистический эксперимент отличается от обычного лабораторного эксперимента тем, что его полностью можно провести на ЭВМ. При его реализации со случайными исходами часто применяют метод статистических испытаний. Методом статистических испытаний решаются сложные задачи, но оправданным он может быть лишь в том случае, если процедура розыгрыша случайных исходов проще, чем другие методы расчета.

Чтобы описывать процесс с помощью аналитического аппарата, производится розыгрыш случайного явления с помощью специально организованной процедуры, включающей в себя случайность и дающей случайный результат. Множество таких исходов используют как статистический материал для получения математического ожидания и дисперсии случайных величин. Изучение физических процессов методом имитационного моделирования с помощью ЭВМ, при многократном проигрывании математических моделей, позволяет более точно определить влияние вариабельности исходных данных на результаты расчетов, для чего нами были созданы расчетные программы. На первом этапе проводятся сбор и обработка статистических данных, и на их основе определяются наиболее значимые параметры процесса. На втором этапе разрабатывается имитационная модель (ИМ), дающая возможность провести комплексное исследование оптимальных параметров. По разработанным программам проводится

а отгрузка ведется с торца [3, 5]. Например, при приготовлении сырьевой смеси для получения пористого керамического кирпича (глина + торф + песок аглопоритовый).

На рисунке 2 представлен бункер, который имеет усреднительный механизм. Данную схему можно использовать при выпуске кирпича керамического, а также аглопорита различного



C_1 – торф; C_2 – глина; C_3 – песок аглопоритовый;
 C_4 – отсев из материалов дробления горных пород
Рисунок 2. – Схема усреднения с одновременной
разгрузкой ячеек для 4-х компонентов сырьевой
смеси для производства кирпича керамического

имитационное моделирование состава смеси при различном распределении возмущающих факторов.

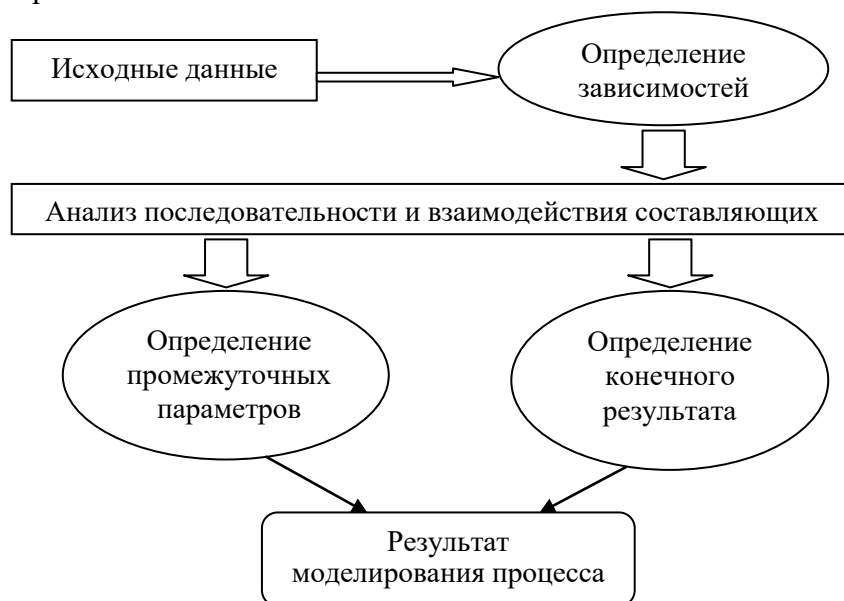


Рисунок 3. – Структура программного модуля усреднительного склада

Расчеты состава содержат формулы с детерминированными параметрами. Вместе с тем, многие характеристики составляющих сырьевой смеси имеют случайный характер. В результате неоднородности качественных характеристик составляющих смеси конечный результат вызывает неритмичность работы, потерю производительности и повышение энергозатрат оборудования. Поэтому возникает необходимость совершенствования методов расчета смеси с учетом случайного характера величин, влияющих на конечный результат. Эта задача с успехом решается применением имитационного моделирования. Для реализации модели процесса усреднения на складах целесообразным представляется метод имитационного моделирования.

Модель склада можно представить в виде информационного преобразователя – программного комплекса, который может быть реализован на ЭВМ. Входными параметрами являются задаваемые векторы входных параметров, на основе которых программно вычисляются векторы выходных параметров (рисунок 4). Если полученный результат удовлетворяет плановым показателям, то решение считается найденным и передается в систему, в другом случае моделирование повторяется с измененными входными параметрами [2, 3, 6].

По отношению к объекту управления – потоку, проходящему через усреднительный склад – на основе данной модели могут быть решены как прямая, так и обратная задачи.

При решении прямой задачи искомым является вектор выходных параметров:

$$B_1(A, C). \quad (6)$$

При решении обратной задачи вектор входных параметров определяется из соотношения:

$$A_1(B, C). \quad (7)$$

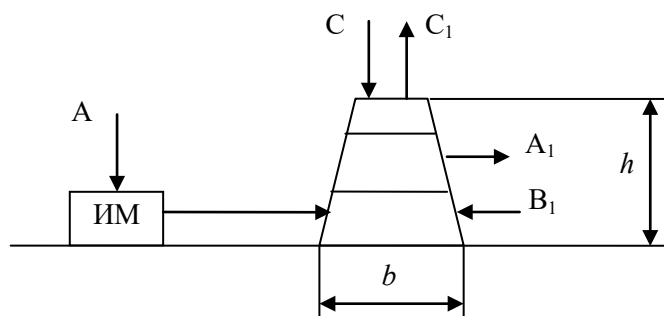


Рисунок 4. – Модель усреднительного склада

Задача оптимизации параметров усреднительного склада, при заданных векторах X и Y , описывается соотношением:

$$C_1 = F(A, B). \quad (8)$$

Постановка задачи в виде (6), (7) дает возможность использовать модель в процессе управления потоком, а постановка в форме (8) позволяет решить задачу оптимизации параметров склада.

Вектор параметров на входе системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$A = \{\gamma, \alpha_i, \beta_i, \lambda_i, \sigma_{ai}\}, \quad (9)$$

где γ – количество смеси качества, завезенного на усреднительный склад за моделируемый период;

α_i – содержание компонента 1 в смеси, %;

β_i, λ_i – среднее содержание компонентов 2-4 в смеси, $i = (1, \dots, N)$;

σ_{ai} – средние квадратические отклонения общего содержания компонентов на входе усреднительного склада за моделируемый период.

Вектор технологических параметров проектируемой системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$C = \{L, b, h, n, V\}, \quad (10)$$

где L, b, h – длина, ширина, высота склада, соответственно;

n – количество слоев в штабеле;

V – объем смеси.

Вектор параметров на выходе проектируемой системы – усреднительного склада – имеет вид:

$$B_1 = \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i, \sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_\lambda, \sigma_n^2\}, \quad (11)$$

где $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \lambda_i$ – общее содержание всех составляющих смеси, отгружаемой со склада за моделируемый интервал времени $i = (1, \dots, m)$;

m – количество отгруженных порций, %;

$\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma, \sigma_\lambda$ – среднеквадратические отклонения общего содержания компонентов в смеси, %;

σ_n^2 – дисперсия качества смеси.

Для оценки корректности моделей, планирования и проведения эксперимента по определению рациональных параметров карьерных усреднительных складов постановка задачи управления потоком может выглядеть следующим образом: имеются данные об объемах и качестве формируемого штабеля. Требуется определить общее содержание сырья в штабеле, его ситовые характеристики и дисперсию качества в отгружаемых порциях за период моделирования.

В качестве управляемых параметров при планировании эксперимента можно принять:

- длину усреднительного штабеля;
- режим поступления сырья в штабель;
- направления перемещения фронта разгрузки сырья.

Эффективность усреднения на карьерных складах может определяться общей дисперсией качества сырьевой смеси в отгружаемых со склада порциях смеси или критерием оптимальности при постановке эксперимента, который имеет вид:

$$\sigma^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Выводы

Результаты исследования могут использоваться для производства пористых материалов на основе аглопорита и керамических изделий с использованием МВТ и ВТЭР.

Был проведен анализ способов усреднения материалов, который позволил выбрать необходимые материалы (торф фрезерный, дробленый брикет), и определить их основные физико-технические свойства (тип торфа, зольность, фракционный состав, влажность).

Установлено, что для стабилизации сырьевой смеси по плотности и прочности необходимо проводить ее усреднение по влажности, гранулометрическому составу, теплотворной способности, которое позволит получить качественный готовый продукт по прочности, плотности и другим показателям. В качестве добавок можно использовать отходы топливных брикетов (лом), по энергетическим свойствам не уступающим закупаемым дорогостоящим добавкам (уголь), а по стоимости – на порядок ниже древесных опилок.

Список цитированных источников

1. **Березовский, Н.И.** Обезвоживание полезных ископаемых: идеи и практика энергосбережения / Н.И. Березовский, Б.А. Богатов. – Минск: Технопринт, 2000. – 170 с.
2. **Авдохин, Б.М.** Основы обогащения полезных ископаемых: в 2 т. / Б.М. Авдохин. – М.: Горная книга, 2008. – Том 1. – 417 с.
3. **Авдохин, Б.М.** Основы обогащения полезных ископаемых: в 2 т. / Б.М. Авдохин. – М.: Горная книга, 2008. – Том 2. – 310 с.
4. Разработать технологические параметры производства аглопорита, направленные на интенсификацию процесса агломерации и экономии энергозатрат: отчет НИИСМИ. – Минск, 1980. – 160 с. – № ГР 81071792.
5. **Васильев, С.Б.** Исследование способов усреднения качества угля на добывающем предприятии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / С.Б. Васильев; ФГОУВПО «Сибирский федеральный университет». – Иркутск, 2009. – 32 с.
6. **Стаценко, Л.Г.** Обоснование рациональных параметров внутрикарьерных складов при управлении рудопотоком асбестового комбината: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21 / Л.Г. Стаценко; Казахский Национальный Технический Университет им. К.И. Сатпаева. – Алматы, 2008. – 31 с.

Berezovsky N.I., Lesun B.V.

Homogenization of a raw mixture by domestic fuels beneficiation

The article studies a possibility of using of milled peat and fuel briquettes as components of raw mixtures for production of open-textured constructional materials instead of different types of coal. The efficiency of the process of homogenization of components of a raw mixture in a warehouse can be determined by a total variance of a raw mixture's quality in portions of the mixture delivered from a warehouse, using the optimality criterion.

Поступила в редакцию 19.05.2016 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.233:622.34.012

ОБКАТКА РЕДУКТОРОВ ГОРНО-ШАХТНЫХ МАШИН

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

Обоснована схема стенда для обкатки редукторов горно-шахтных машин с приложением эксплуатационной нагрузки только к валам и зубчатым колесам, образующим замкнутый контур. Отсутствие тормоза с малыми энергетическими затратами на привод стенда обеспечивает экономическую эффективность его использования.

Введение

Обкатка изготовленного или отремонтированного агрегата подготавливает его к предстоящему использованию по назначению путем приведения в движение в управляемом режиме с выполнением некоторых дополнительных работ. Основное содержание обкатки редукторов состоит в приработке трущихся поверхностей друг к другу, что обеспечивает в дальнейшем их работу с минимальным изнашиванием без схватывания, задиров и заедания. При обкатке происходит опрессовывание прокладок и резьб, а детали занимают эксплуатационное положение. Во время обкатки подтягивают резьбовые соединения, выявляют и устраняют течи жидкостей.

Обкатка редукторов протекает в две стадии. Первую стадию обкатки выполняют в конце их изготовления или ремонта на стенде в течение 0,5-2,0 ч под нагрузкой, изменяющейся от нулевой до эксплуатационной на машиностроительном или ремонтном предприятии, а вторую – в течение 20-30 ч при использовании по назначению в условиях эксплуатационного предприятия.

Приработка трущихся соединений агрегата – самоорганизующийся процесс их начального изнашивания под действием управляемой нагрузки на трущиеся поверхности при установленной относительной скорости скольжения, сопровождающийся нужными изменениями, как геометрических параметров этих поверхностей, так и физико-механических свойств материала поверхностных слоев. Изменения поверхностей трения выражаются тем [1], что контактирующие выступы шероховатости пластически деформируются, становятся более плоскими (рисунок 1), а их материал наклепывается. Изменяется вид кривой опорной поверхности, а шероховатость поверхностей становится равновесной (устойчивой). Изменяются волнистость поверхностей и в меньшей степени – их форма и расположение. Образуется новый микрорельеф. Изменяются также физико-механические свойства материала поверхностных слоев: повышаются их твердость и внутренние напряжения в них, снижаются пластичность и коэффициент трения. Эти изменения приводят к уменьшению силы трения, появлению устойчивого следа контакта на поверхностях трения, снижению и стабилизации температуры материала деталей и уменьшению скорости их изнашивания. Правильно организованная приработка трущихся соединений позволяет более полно использовать расчетный ресурс агрегатов. Обработкой резанием при изготовлении и восстановлении деталей невозможно достичь комплекса свойств поверхностных слоев, которые обеспечиваются приработкой соединений.

Цель работы – обосновать выбор оборудования для обкатки редукторов, обеспечивающего нормативное качество процесса с минимальным расходом энергии.

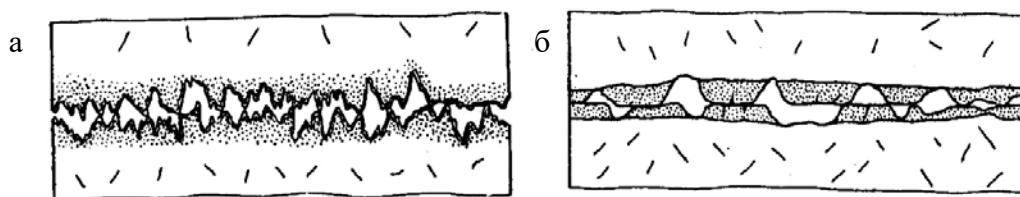
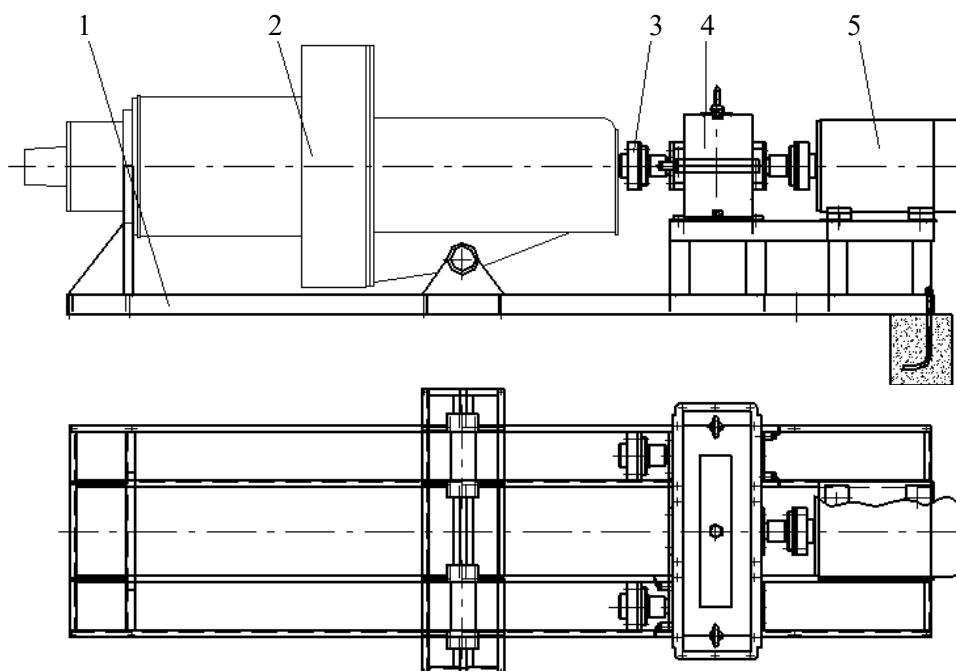


Рисунок 1. – Схема строения соприкасающихся поверхностей в результате обработки резанием (а), приработки (б)

Основная часть

Для обкатки используют стенды двух видов. Первый вид стендов – обкаточно-тормозных – основан на традиционной схеме нагружения, при которой крутящий момент от приводного двигателя прикладывают к ведущему валу обкатываемого агрегата, а нагрузку на ведомый вал агрегата создают тормозом [2]. Реализация способа при обкатке редукторов горно-шахтного оборудования, передающих мощность, измеряемую сотнями кВт, сопряжена со значительными и излишними энергетическими затратами. Второй вид стендов [3], в которых нагрузку на прирабатываемые соединения создают только в замкнутом кинематическом контуре из валов и зубчатых колес обкатываемого агрегата и механизма нагружения, является более рациональным. В этот контур не входит приводной двигатель, поэтому нет необходимости в использовании тормоза. Мощность приводного двигателя в стенде второго вида на порядок меньше мощности двигателя в устройствах первого вида. Схема стенда второго вида более сложная по сравнению со схемой стенда первого вида, однако стенд второго вида требует меньших затрат энергии. Стенд для обкатки редукторов горно-шахтных машин представлен на рисунке 2.



1 – рама; 2 – обкатываемый редуктор; 3 – муфта;
4 – механизм нагружения; 5 – электродвигатель

Рисунок 2. – Стенд для обкатки редуктора привода фрез проходческого комбайна ПК-8

Стенд для обкатки редукторов горно-шахтных машин включает установленные на раме 1 приводной электродвигатель 5, механизм нагружения 4 и опоры для установки обкатываемого редуктора 2. Момент от двигателя к механизму нагружения и от последнего к обкатываемому редуктору передают с помощью муфт 3. Рама стенда закреплена на полу фундаментными болтами.

Изготовленный или отремонтированный редуктор устанавливают с помощью подъемного механизма на опорные элементы стенда, а его ведущие валы соединяют с помощью муфт с валами нагрузочного устройства.

При обкатке редуктора вращение от вала электродвигателя 5 передается к валам механизма нагружения 4, который создает на валах редуктора крутящие моменты, значения которых установлены технологической документацией. В кинематический контур (рисунок 3), элементы которого нагружены расчетными крутящими моментами, входят валы и зубчатые колеса обкатываемого редуктора z_1, z_2, z_3, z_4, z_5 и z_6 , а также валы и колеса $z_{1н}$ и $z_{2н}$ механизма нагружения. Колеса $z_{1н}$ и $z_{2н}$ косозубые, они имеют возможность осевого перемещения под действием приложенного усилия, которое приводит к повороту колес $z_{2н}$ в разные стороны и нагружению контура установленным моментом.

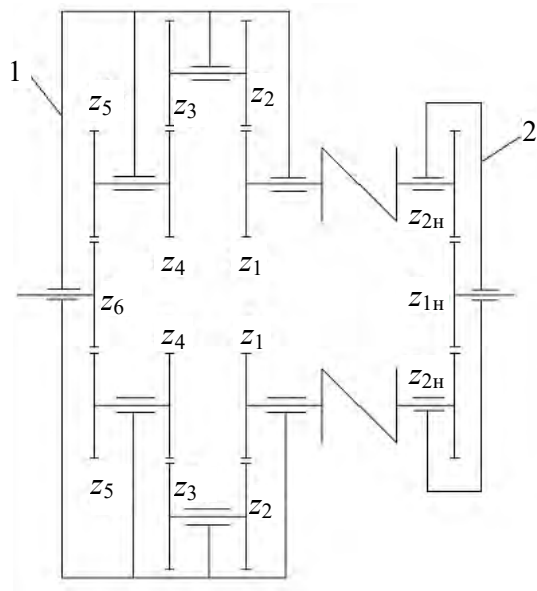


Рисунок 3. – Кинематический контур из валов и зубчатых передач обкатываемого редуктора 1 и механизма нагружения 2

Усилия от гидроцилиндров на диски передаются через штоки, закрепленные в дисках с помощью винтов. Нагрузку на детали в кинематическом контуре создают путем подачи масла под давлением в гидроцилиндры. Перемещение их штоков с усилием F_a (Н) приводит к возникновению моментов M на валах 3

$$M = F_a d_o / 2 \tan(\beta + f), \text{ Нм},$$

где d_o – делительный диаметр ведомого колеса, м;

β – угол наклона зубьев, град.;

f – угол трения.

При обкатке редукторов на каждом ее переходе нормируют частоту вращения ведущего вала n (мин⁻¹) и момент M (Нм).

Механизм нагружения стенда (рисунок 4) устроен и работает следующим образом. В корпусе 1 на подшипниках качения установлены ведущий вал 6 и два ведомых вала 3. На ведущем валу с помощью призматической шпонки установлена косозубая шестерня 5. На ведомых валах расположены ведомые косозубые колеса 7, которые имеют возможность осевого перемещения по прямым шлицам валов. На этих валах с возможностью осевого перемещения также расположены диски 4, каждый из которых взаимодействует с ведомым колесом посредством упорного подшипника 8. Каждый диск перемещается усилием шести гидроцилиндров 2, равномерно расположенных на поверхности воображаемого цилиндра, ось которого совпадает с осью ведомого вала. Уси-

Нагрузку на валы обкатываемого редуктора изменяют путем регулирования давления масла, подаваемого в гидравлические цилиндры.

Диаметр d гидравлических цилиндров равен

$$d = \sqrt{\frac{2F_a}{\pi n p \eta}}, \text{ м,}$$

где n – количество гидравлических цилиндров;

p – давление масла в системе, Па;

η – КПД привода.

Момент, прилагаемый к ведущему валу редуктора, преодолевает моменты от сил трения в соединениях агрегата. Этот момент M_{mp} равен

$$M_{mp} = M f_{np},$$

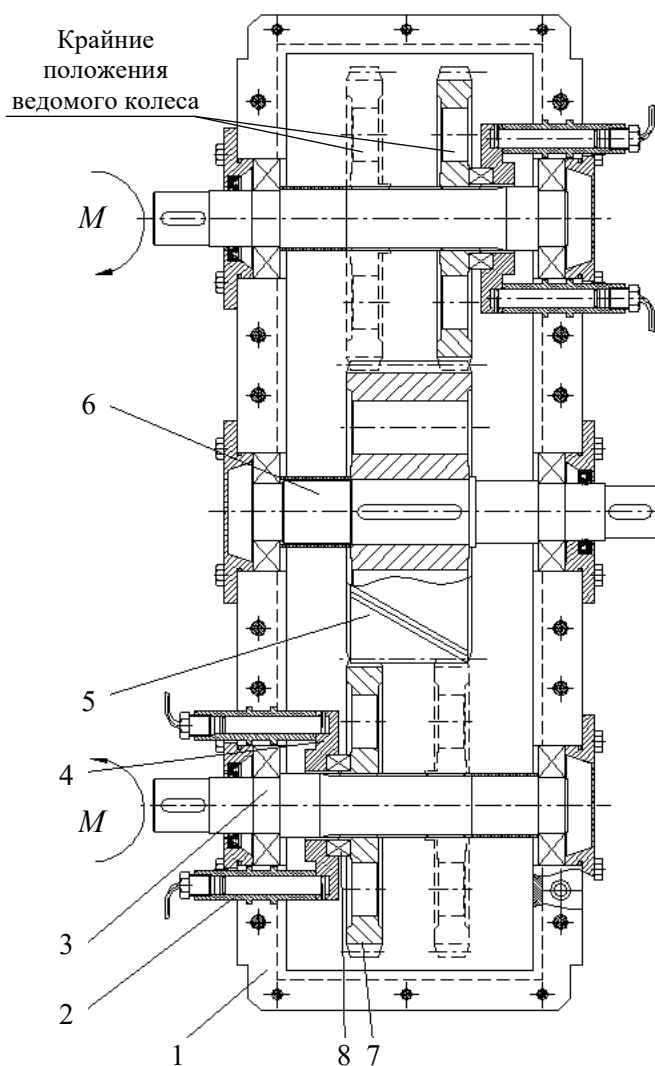
где f_{np} – приведенный коэффициент трения в соединениях редуктора.

Отношение k моментов, приложенных от приводного электродвигателя к ведущим валам обкатываемого редуктора в разработанном стенде и в стенде с тормозом, равно

$$k = \frac{M_{mp}}{M + M_{mp}} = \frac{M f_{np}}{M + M f_{np}} = \frac{f_{np}}{1 + f_{np}}.$$

Таким образом, мощность приводного электродвигателя в стенде с обкаткой редуктора с нагружением только замкнутого контура из валов и зубчатых колес составляет 5-10 % от мощности одноименного двигателя в стенде традиционной конструкции.

Если конструкция обкатываемого агрегата не позволяет образовать кинематический контур из валов и зубчатых колес одного агрегата, то такой контур создают из элементов двух обкатываемых агрегатов. В таком случае кинематически соединяют между собой ведомые валы обоих агрегатов, а ведущие валы соединяют с механизмом нагружения, вращение к которому передается от приводного электродвигателя. При вращении валов и зубчатых передач контура энергия привода затрачивается только на преодоление сил трения в подшипниках качения и между зубьями колес. Для обеспечения приработки зубьев колес в редких необходимых случаях с двух сторон изменяют направление вращения валов на каждом из режимов обкатки.



1 – корпус; 2 – гидроцилиндр; 3 – вал ведомый; 4 – диск; 5 – шестерня ведущая; 6 – вал ведущий; 7 – колесо ведомое; 8 – подшипник упорный
Рисунок 4. – Механизм нагружения редуктора

После обкатки редуктора снимают муфты, соединяющие валы механизма нагружения и редуктора, после чего снимают обкатываемый редуктор со стенда с помощью подъемного механизма.

Заключение

Показана эффективность использования схемы обкаточного стенда с нагружением редуктора в замкнутом контуре, составленном из его валов и зубчатых колес, по сравнению с разомкнутой схемой стенда, составленной из приводного двигателя, обкатываемого редуктора и тормоза.

Разработанный стенд может быть использован для обкатки редукторов привода фрез проходческого комбайна ПК-8 на предприятиях ОАО «Беларуськалий». Редуктор рассчитан на передачу мощности 110 кВт. Мощность привода стенда, обеспечивающего обкатку редуктора на нормативных режимах, составляет 15 кВт.

Список цитированных источников

1. **Стрельцов, В.В.** Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков. – М.: Колос, 1995. – 175 с.
2. Ремонт машин / К.А. Ачкасов [и др.]; под ред. Н.Ф. Тельнова. – М.: Агропромиздат, 1992. – 360 с.
3. **Шадричев, В.А.** Основы технологии автостроения и ремонт автомобилей: учебник / В.А. Шадричев. – Л.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

Ivanov V.P.

Running-in of gears of mining machines

The article presents a schedule for running-in of gears of mining machines with the application of operational loads only to shafts and the toothed wheels forming a closed loop. The lack of brakes with a small energy input to the actuator of the stand ensures the economic efficiency of its use.

Поступила в редакцию 19.05.2016 г.

УДК 621.891(075.8)

ИЗНАШИВАНИЕ РОЛИКОВ ВАЛКОВОГО ПРЕССА В ДИСПЕРСНОЙ МАССЕ ХЛОРИСТОГО КАЛИЯ

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

Обсуждаются закономерности влияния нагрузочно-скоростных режимов трения качения на интенсивность изнашивания роликов из хромоникелевой стали в дисперсной массе хлористого калия. Показано, что бандажные ролики вальц-пресса подвергаются усталостному, окислительному и абразивному изнашиванию. При повышении нагрузки и скорости относительного перемещения деталей, приводящем к росту температуры в контакте, вклад процесса окисления стали в изнашивание роликов увеличивается и может достигать ориентировочно 30 %. Окислительное изнашивание металла локализуется, в основном, в полосах скольжения и прилегающих к ним областях.

Введение

Интенсивность изнашивания бандажных валков вальц-пресса, уплотняющих порошковую массу калийных удобрений, определяет число отказов и производительность процесса их гранулирования [1, 2]. Поэтому важно выявить закономерности влияния эксплуатационных факторов на изнашивание валков. К этим факторам, в частности, относятся не только нагрузка и скорость вращения роликов, но и химический состав уплотняемого сырья и окружающей среды, температура нагрева уплотняемой массы, элементный состав металла, из которого изготовлены бандажные ролики. Весьма важным фактором является геометрия рабочих поверхностей бандажных роликов.

Выполненные ранее исследования показали, что интенсивность изнашивания бандажных роликов повышается при увеличении контактного давления, что обусловлено ускорением усталостного, абразивного и адгезионного процессов разрушения поверхностных слоев трущихся деталей [3]. При обедненной подаче хлористого калия в зону контакта более существенным становится вклад окислительного изнашивания, однако интенсивность изнашивания в целом снижается, т.к. тонкий слой калийной соли (КСl) выполняет функцию экрана, предохраняющего металлы сопрягаемых деталей от непосредственного контакта [4]. В реальных условиях бандажные ролики вальц-пресса разделены толстым слоем КSl, который деформируется в процессе уплотнения и нагревается. Это должно ускорять процесс окисления металла и сопровождаться повышением интенсивности изнашивания бандажных роликов. Таким образом, для разработки мер по повышению износостойкости бандажных роликов необходимо изучить особенности изнашивания хромоникелевой стали при трении качения в среде хлористого калия и оценить вклад коррозионных процессов в разрушение поверхностных слоев сопрягаемых деталей при различных режимах нагружения.

Методика испытаний

Испытания проводили на дисковой машине трения МД-1 по схеме контакта «бандажная 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, поэтому крайние его точки находятся на разном расстоянии от оси вращения диска и перемещаются с различными скоростями. Ролик 1 изготавливался из высококачественной легированной стали марки 38ХНЗМФА

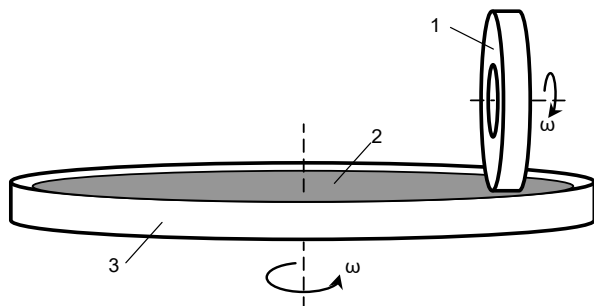


Рисунок 1. – Схема контакта образцов на машине трения МД-1

в виде цилиндра высотой 12 мм и наружным диаметром 40 мм. Цилиндрическая поверхность роликов выполнялась гладкой. Номинальная площадь поверхности трения ролика составляла $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а шероховатость поверхности соответствовала среднему арифметическому отклонению профиля $R_a = 0,06 \text{ мкм}$.

Под действием нормальной нагрузки ролик уплотнял слой дисперсной рабочей среды 2, расположенный на диске 3.

В качестве рабочей среды использовался мелкодисперсный порошок хлористого калия (KCl), получаемый из сильвинита путем разделения хлористого калия и хлористого натрия (NaCl), либо его смесь с мелом. Нагрузка на ролик задавалась сменными грузами через рычаг, а скорость относительного перемещения v сопрягаемых деталей – изменением расстояния ролика от оси вращения диска.

Максимальное давление P_0 на контактной площадке рассчитывали по формуле Герца, принимая модуль упругости насыпной массы хлористого калия $E = 3 \cdot 10^9 \text{ МПа}$. Износ образцов регистрировали методом взвешивания, а линейную интенсивность изнашивания I_h стали определяли по формуле

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

где Δm – изменение массы ролика (контртела) в результате изнашивания;

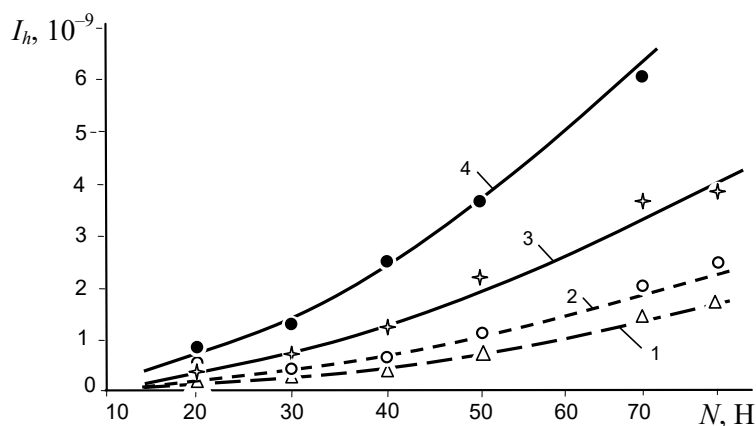
ρ – плотность изнашиваемого материала;

A_a – номинальная площадь поверхности трения ролика;

L – путь трения.

Результаты испытаний

Линейная интенсивность изнашивания роликов с гладкими поверхностями существенно зависит от нагрузки и скорости их перемещения относительно диска (рисунок 2). Повышение нормальной нагрузки N вызывает увеличение I_h , причем в области высоких нагрузок эта зависимость более заметна. При малых нагрузках доминирующую роль в изнашивании металла играет процесс усталостного разрушения его поверхностного слоя. Поэтому величина I_h определяется в основном знакопеременными контактными деформациями материала ролика [4]. В области высоких нагрузок ($N > 40 \text{ Н}$) ускорению усталостного разрушения металла способствует повышение температуры вершин контактирующих выступов сопрягаемых деталей и тонких пленок хлористого калия между ними. В данном случае возможны: снижение механических характеристик материала вершин выступов, их многократная пластическая деформация и повышение химической активности металла. В итоге перечисленные причины приводят к ускорению химического взаимодействия KCl с металлом и его окислению на локальных участках контакта, что вызывает рост интенсивности изнашивания.



1 – $v = 0,12$ м/с; 2 – $v = 0,2$ м/с; 3, 4 – $v = 0,3$ м/с

Рисунок 2. – Зависимости интенсивности изнашивания роликов с гладкой рабочей поверхностью от нормальной нагрузки при трении в присутствии хлористого калия (1-3) и в воздушной среде (4)

Роль температуры в процессе изнашивания подтверждается взаимным расположением кривых 1-3 на рисунке 2, свидетельствующем о том, что увеличение скорости v относительного перемещения трущихся деталей сопровождается ростом интенсивности изнашивания ролика. Причем, в области высоких скоростей зависимость $I_h(v)$ усиливается. Здесь скорость оказывает влияние на I_h посредством двух противоположно действующих факторов. С одной стороны, по мере увеличения скорости возрастает температура на пятнах контакта, а также температура деформируемого слоя KCl, что в силу вышеуказанных причин должно интенсифицировать усталостное и окислительное изнашивание. С другой стороны, с ростом v уменьшается время нахождения сопрягаемых деталей в контакте, между ними образуется более толстый экранирующий слой хлористого калия, предохраняющий ролик и диск от непосредственного контакта. В итоге, I_h ролика должна снижаться. В нашем случае первая составляющая I_h доминирует, что обеспечивает монотонное увеличение линейной интенсивности изнашивания ролика.

Для сравнения на рисунке 2 приведена кривая 4, характеризующая изнашивание ролика при отсутствии слоя из хлористого калия. Видно, что разделение трущихся деталей слоем KCl снижает интенсивность изнашивания ролика приблизительно в 2 раза. Причина в том, что этот слой практически исключает возможность образования мостиков сварки и реализации адгезионного изнашивания и, снижая контактные деформации, уменьшает вклад усталостного разрушения поверхности трения ролика. Снижение интенсивности адгезионного и усталостного изнашивания при переходе от воздушной к KCl-содержащей среде в некоторой степени компенсируется повышением интенсивности окислительного изнашивания, вклад которого возрастает при увеличении контактного давления и скорости скольжения.

Подтверждением того, что окислительные процессы вносят существенный вклад в изнашивание бандажей валков вальц-пресса, являются представленные на рисунке 3 снимки поверхностей трения изношенных роликов. Анализ кинетики процесса изнашивания показал, что в начальный период на поверхности трения появляются малозаметные полосы скольжения – неглубокие бороздки, ориентированные параллельно вектору скорости скольжения v (стрелка 1 на рисунке 3а). Это указывает на слабо проявляющееся абразивное изнашивание. С течением времени реализуются одновременно два процесса разрушения поверхности трения ролика: усталостное и коррозионное.

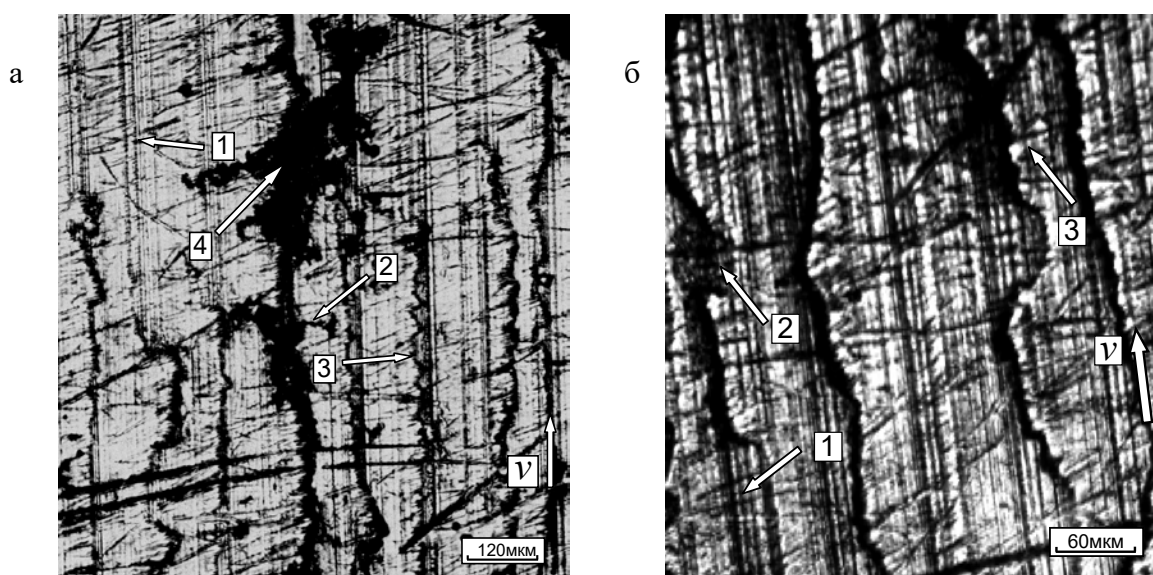


Рисунок 3. – Поверхность трения стального ролика после изнашивания в присутствии хлористого калия

Об усталостном разрушении поверхностного слоя стали свидетельствуют микротрещины, растущие от бороздок преимущественно перпендикулярно вектору v (стрелка 2 на рисунке 3а). Начало и область зарождения микротрещин обусловлены значительно более высокой концентрацией дефектов в бороздках, а направление их распространения – напряженно-деформированным состоянием поверхностного слоя ролика при трении.

Так, многократные пластические деформации металла абразивными частицами в объеме бороздок и прилегающих к ним областях сопровождаются появлением дефектов кристаллической решетки, ультрамикротрещин, пор и других неоднородностей микроструктуры, которые с течением времени аккумулируются в отдельных объемах и, после достижения предельной концентрации, сливаются, образуя микротрещину. Ее дальнейший рост в поперечном скольжении направлении обусловлен деформациями растяжения за площадкой контакта, ориентированными перпендикулярно v .

Поскольку тонкий поверхностный слой ролика испытывает при трении циклически повторяющиеся упругопластические деформации, его химическая активность и температура повышаются, что приводит к значительному ускорению процесса окисления металла. По этой причине именно в объеме бороздок и прилегающих к ним областях образуются толстые оксидные слои, которые впоследствии легко разрушаются, обеспечивая окислительное изнашивание. Неравномерное распределение интенсивности протекания процесса окисления металла по поверхности трения подтверждается снимком дорожки трения ролика, на котором видны вытянутые вдоль полос скольжения пятна коррозии черного цвета (в цветном изображении – пятна бурого цвета) с неровными краями (рисунок 3а, стрелка 3). На отдельных участках коррозия распространяется на значительные по размеру площадки, захватывая области, расположенные между полосами скольжения (обозначены стрелкой 4 на рисунке 3а).

Представленный на рисунке 3б снимок поверхности трения ролика после удаления следов коррозии подтверждает сказанное выше: ролик подвергается абразивному (полосы скольжения, обозначенные стрелкой 1), окислительному (пятна, обозначенные

стрелкой 2) и усталостному (трещины 3, перпендикулярные вектору скорости скольжения) видам изнашивания. В данном случае, наряду с усталостным, окислительное изнашивание можно отнести к доминирующему виду. Об этом свидетельствует наличие глубоких борозд на поверхности трения, происхождение которых не может быть обусловлено ни абразивным (борозды имеют криволинейный профиль), ни чисто усталостным разрушением поверхностного слоя. Признаки, свидетельствующие об адгезионном изнашивании металла, на поверхностях всех исследуемых образцов, не обнаружены.

Приведенный анализ состояния изношенных поверхностей трения роликов позволяет дать качественную оценку вклада процесса окисления в интенсивность их изнашивания. Для количественной оценки этого вклада были выполнены исследования, идея которых заключается в следующем. Управление интенсивностью окислительного изнашивания при прочих равных условиях испытаний можно осуществлять изменением концентрации хлористого калия в массе, разделяющей ролик и диск. С этой целью в дисперсную массу KCl добавлялся порошок мела, который не вызывает заметного окисления стали. Таким образом, коррозионная активность дисперсной массы уменьшалась за счет уменьшения концентрации активного компонента, а интенсивность абразивного и усталостного изнашивания должна при этом оставаться неизменной. Причина в том, что частицы обоих компонентов такой смеси обладают практически одинаковым сопротивлением сдвигу и близкой твердостью – соответствуют второму классу твердости по шкале Мооса.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 4, свидетельствуют о том, что по мере уменьшения концентрации (C) хлористого калия хромоникелевая сталь изнашивается менее интенсивно. Так, переход от испытаний в дисперсной массе, содержащей $C = 100$ мас. % KCl, к испытаниям при $C = 30-50$ мас. % сопровождается снижением показателя I_h в $\sim 1,4-1,6$ раза. Видно, что при выбранных режимах нагружения, обеспечивающих интенсивное окисление металла, вклад окислительного изнашивания составляет около 30 % суммарного износа хромоникелевой стали. Вклад абразивного изнашивания при всех режимах испытаний минимален.

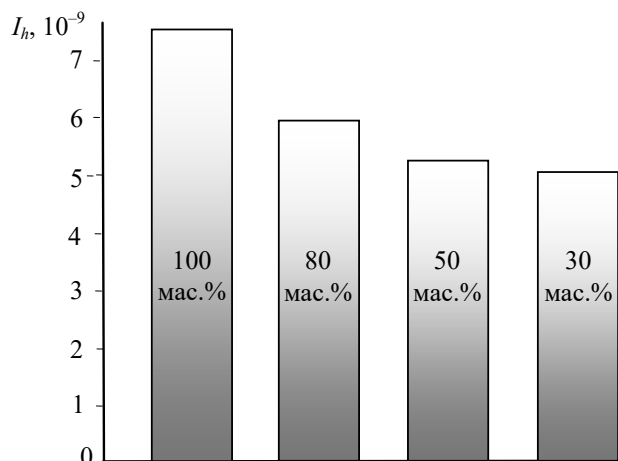


Рисунок 4. – Влияние содержания KCl в дисперсной среде на интенсивность изнашивания стали при $N = 70$ Н и $v = 0,3$ м/с

Заключение

При увеличении контактного давления интенсивность изнашивания ролика вальц-пресса повышается, что обусловлено ускорением усталостного, коррозионно-механического и абразивного (незакрепленными частицами) процессов разрушения его поверхностного слоя. С повышением скорости относительного перемещения возрастает вклад окислительного изнашивания, которое локализуется в основном в полосах скольжения, и может достигать 30 %.

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. **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.
 3. **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.
 4. **Богданович, П.Н.** Трение, смазка и износ в машинах: учебник / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак, С.П. Богданович. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 527 с.
-

Ishchenko M.V., Kondratchik N.Yu.

Depreciation of rollers of a roll compactor in dispersive mass of potassium chloride

The influence pattern of loading and speed limits of rolling friction on wear rates of rollers made of chromium-nickel steel in dispersive mass of potassium chloride has been discussed. It has been demonstrated that the bandages of a roll compactor's rollers are effected by fatigue, oxidation and abrasion wear. The influence of process of steel oxidation in the rollers' wear is growing and can reach approximately 30 per cent by increase in load and speed relative to the parts' movement that is resulted in temperature rise in contact. Oxidation wear of the metal is concentrated first of all in slip bands and parts adjacent to them.

Поступила в редакцию 30.12.2015 г.

УДК 621.65.01

ДАВЛЕНИЕ ОСЕВОГО НАГНЕТАТЕЛЯ С ИЗОГНУТЫМИ ЛОПАСТЯМИ

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

Выведены формулы для вычисления теоретических величин скоростей движения среды в осевом, тангенциальном и радиальном направлениях, а также скорости движения среды относительно лопасти колеса при изменении угла наклона лопастей по ходу движения среды. Получены выражения для расчета теоретических величин давлений: статического в осевом направлении и динамического в тангенциальном направлении, а также давления в радиальном направлении, создаваемого центробежной силой. Приведены графические зависимости отношений скоростей среды к окружной скорости колеса и создаваемого давления от изменяющегося угла наклона лопастей по ходу движения среды. При малых углах наклона лопасти создается преимущественно статическое давление. Максимальный расход среды достигается при угле наклона лопастей на выходе из колеса 58° . Величина давления, создаваемого центробежной силой, намного меньше давления, образованного лопастями.

Введение

Энергия, передаваемая среде вращающимся колесом осевого нагнетателя (рисунок 1), может быть рассчитана по основному уравнению центробежной машины [1]

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

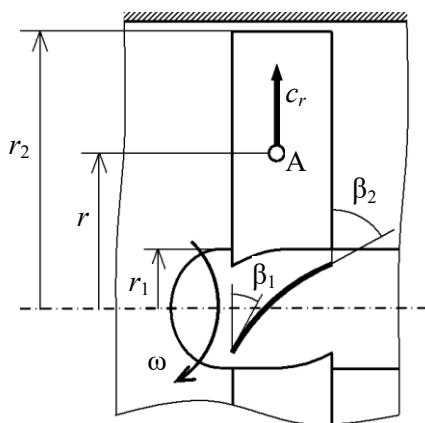


Рисунок 1. – Схема осевой машины с изогнутой лопастью

В известном уравнении учтена только кинетическая энергия, передаваемая колесом среде, и не отражена потенциальная энергия давления, приобретаемая средой.

В работе [2] рассмотрена лопасть в виде плоской пластины, закрепленной на втулке под углом β к плоскости вращения. На основе анализа сил, действующих на среду со стороны лопасти, при условии постоянства угла наклона лопасти β по ее длине определена скорость движения среды c в направлении, перпендикулярном плоскости лопасти, а также ее тангенциальная c_u и осевая c_a составляющие соответственно. Найдена также скорость движе-

ния среды c_r в радиальном направлении, которая равна скорости движения среды в тангенциальном направлении ($c_r = c_u$). Отношения перечисленных параметров к окружной скорости колеса u при отсутствии закручивания среды на входе имеют вид:

$$\frac{c}{u} = \sin \beta; \quad (2)$$

$$\frac{c_u}{u} = \frac{c_r}{u} = \sin^2 \beta; \quad (3)$$

$$\frac{c_a}{u} = \sin \beta \cdot \cos \beta. \quad (4)$$

Отношение скорости w движения среды относительно лопасти к окружной скорости колеса u составляет

$$\frac{w}{u} = \cos \beta. \quad (5)$$

Найдены также выражения для расчета статического P_a , динамического P_u давлений среды, а также давления P_r , создаваемого центробежной силой:

$$P_a = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) \cos^2 \beta; \quad (6)$$

$$P_u = \rho(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}); \quad (7)$$

$$P_r = \frac{\rho}{2}(c_{2u}^2 - c_{1u}^2). \quad (8)$$

Результаты исследований

Часто лопасти изготавливают изогнутыми для минимизации потерь на удар при входе среды в колесо (рисунок 1) так, чтобы угол наклона лопасти на входе в колесо был меньше, чем на выходе из него ($\beta_1 < \beta_2$). Выделим на поверхности изогнутой лопасти точку А, удаленную на расстояние r от оси вращения. Окружная скорость колеса в этой точке составляет $u = \omega r$, а среда движется под воздействием лопасти со скоростью c в направлении, перпендикулярном касательной к плоскости лопасти (рисунок 2). Тангенциальная c_u составляющая скорости среды направлена в сторону окружной скорости u , а осевая c_a – вдоль оси колеса. Под действием центробежной силы среда движется в радиальном направлении со скоростью c_r (рисунок 1). Значения этих скоростей могут быть определены из формул (2)-(4).

Отношения статического и динамического давлений, а также давления, создаваемого центробежной силой, к произведению плотности на окружную скорость колеса в квадрате в точке А могут быть определены, соответственно, по выражениям [2]:

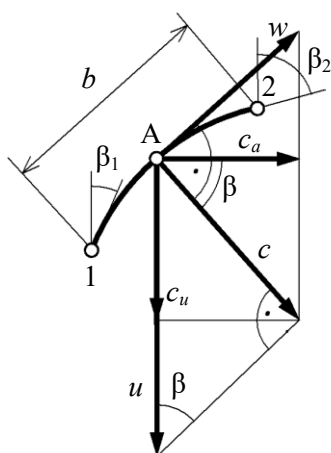


Рисунок 2. – Отношения скоростей движения среды к окружной скорости колеса

$$\frac{P_a}{\rho u^2} = \cos^2 \beta; \quad (9)$$

$$\frac{P_u}{\rho u^2} = \sin^2 \beta; \quad (10)$$

$$\frac{P_r}{\rho u^2} = \frac{\sin^4 \beta}{2}. \quad (11)$$

Поскольку угол наклона лопасти изменяется от β_1 на входе среды в колесо до β_2 на выходе из него, то меняются также величины скоростей в соответствии с выражениями (2)-(5). Отношения средних величин соответствующих скоростей движения среды по всей ширине лопасти к окружной скорости колеса в этом случае могут быть найдены интегрированием указанных зависимостей по переменной β [3]:

$$\frac{c_m}{u} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta = \frac{|\cos \beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{\beta_2 - \beta_1}; \quad (12)$$

$$\frac{c_{um}}{u} = \frac{c_{rm}}{u} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin^2 \beta d\beta = \frac{|\beta - 0,5 \sin 2\beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{2(\beta_2 - \beta_1)}; \quad (13)$$

$$\frac{c_{am}}{u} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta \cdot \cos \beta d\beta = \frac{|\sin^2 \beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{2(\beta_2 - \beta_1)}; \quad (14)$$

$$\frac{w_m}{u} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos \beta d\beta = \frac{|\sin \beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{\beta_2 - \beta_1}. \quad (15)$$

При изменении угла наклона лопасти по ходу движения среды меняется также давление, создаваемое лопастями и центробежной силой. Отношения средних величин статического и динамического давлений, а также давления, создаваемого центробежной силой, к произведению плотности на окружную скорость колеса в квадрате выводятся интегрированием соответствующих зависимостей (9)-(11) [3]:

$$\frac{P_{am}}{\rho u^2} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \cos^2 \beta d\beta = \frac{|\beta + 0,5 \sin 2\beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{2(\beta_2 - \beta_1)}; \quad (16)$$

$$\frac{P_{um}}{\rho u^2} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin^2 \beta d\beta = \frac{|\beta - 0,5 \sin 2\beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{2(\beta_2 - \beta_1)}; \quad (17)$$

$$\frac{P_{rm}}{\rho u^2} = \frac{1}{\beta_2 - \beta_1} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{\sin^4 \beta}{2} d\beta = \frac{|3\beta - 2 \sin 2\beta + 0,25 \sin 4\beta|_{\beta_1}^{\beta_2}}{16(\beta_2 - \beta_1)}. \quad (18)$$

С учетом результатов работы [2] выражения для расчета давления, создаваемого осевым нагнетателем, по всей ширине и длине лопасти от r_1 до r_2 принимают вид:

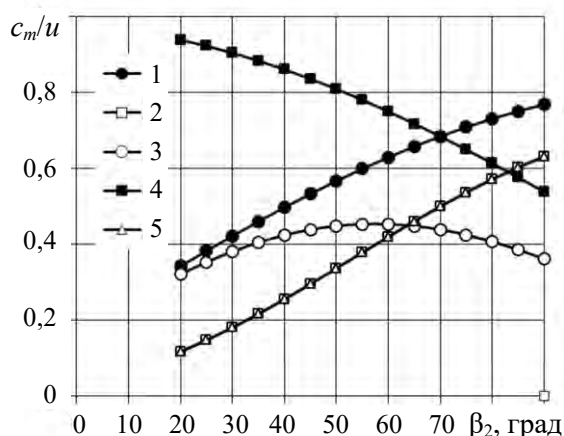
$$P_{am} = \rho(u_2 - u_1) \left[\frac{1}{2} + \frac{\sin 2\beta_2 - \sin 2\beta_1}{4(\beta_2 - \beta_1)} \right]; \quad (19)$$

$$P_{um} = \rho(u_2 - u_1) \left[\frac{1}{2} - \frac{\sin 2\beta_2 - \sin 2\beta_1}{4(\beta_2 - \beta_1)} \right]; \quad (20)$$

$$P_{rm} = \rho(u_2 - u_1) \left[\frac{3}{16} - \frac{\sin 2\beta_2 - \sin 2\beta_1}{8(\beta_2 - \beta_1)} + \frac{\sin 4\beta_2 - \sin 4\beta_1}{64(\beta_2 - \beta_1)} \right]. \quad (21)$$

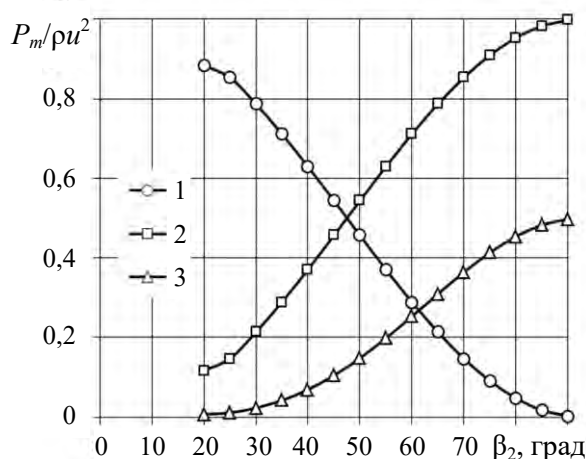
Графическое изображение функций в соответствии с формулами (12)-(15) при угле наклона лопасти на входе среды в колесо 20° приведено на рисунке 3.

С увеличением угла β_2 функции согласно выражениям (12) и (13) возрастают (значения первой больше), а функция по выражению (15) снижается. Функция в соответствии с формулой (14) первоначально возрастает, принимает максимальное значение при $\beta_2 \approx 58^\circ$ и затем снижается. Функции по выражениям (12) и (15) уравниваются при $\beta_2 = 70^\circ$, по



1 — c_m/u ; 2 — c_{um}/u ; 3 — c_{am}/u ;
4 — w_m/u ; 5 — c_{rm}/u

Рисунок 3. — Зависимости отношений скоростей от угла наклона лопастей на выходе из колеса



1 — $P_{am}/\rho u^2$; 2 — $P_{um}/\rho u^2$; 3 — $P_{rm}/\rho u^2$

Рисунок 4. — Зависимости давлений осевого нагнетателя от угла наклона лопастей на выходе из колеса

этом возрастают потери энергии, связанные с трением потока о поверхности направляющего аппарата, а также увеличивается крутящий момент, создаваемый направляющим аппаратом, и, соответственно, усилия на опорную конструкцию. Максимальный расход среды достигается ориентировочно при угле наклона лопастей на выходе из колеса 58° .

Выводы

Найденные формулы позволяют определить теоретические параметры осевого нагнетателя с криволинейными лопастями. Скорости движения среды под влиянием лопастей в тангенциальном и радиальном направлениях равны по величине. Скорость движения среды в осевом направлении максимальна при угле наклона лопастей на выходе из колеса около 58° , что соответствует наибольшему расходу среды. При малых углах наклона лопасти создается преимущественно статическое давление. Угол накло-

(13) и (15) — при $\beta_2 \approx 83^\circ$, по (13) и (14) — при $\beta_2 \approx 63^\circ$, а по (12) и (14) сближаются при уменьшении угла β_2 . Графическое изображение функций в соответствии с формулами (16)-(18) при том же угле наклона лопасти на входе среды в колесо приведено на рисунке 4.

По мере возрастания угла β_2 функция по формуле (16) снижается, а по (17) возрастает сначала медленно, затем энергично, и по мере приближения угла β_2 к 90° — опять медленно. При малых углах наклона лопасти создают преимущественно статическое давление. Функция по формуле (18) при возрастании β_2 увеличивается, как и по формуле (17), но ее рост менее значимый. Кроме того, центробежная сила создает давление в радиальном направлении, которое непосредственно не влияет на статическое и динамическое давление осевого нагнетателя.

Таким образом, для создания максимального статического давления угол наклона лопастей на входе в колесо должен быть минимальным, а на выходе из колеса составлять примерно 45° . При дальнейшем увеличении угла β_2 прирост статического давления, создание которого является одной из основных задач осевого нагнетателя, снижается, а динамического давления — возрастает, что усложняет задачу его последующего преобразования в статическое давление с помощью направляющего аппарата. При

на лопастей на выходе из колеса целесообразно принимать равным 45° . Величина давления, создаваемого центробежной силой намного меньше давления, образываемого лопастями.

Список цитированных источников

1. Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
2. Павлечко, В.Н. Влияние лопастей на давление осевого нагнетателя / В.Н. Павлечко, Г.В. Казаченко // Горная механика и машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 56-62.
3. Воднев, В.Т. Основные математические формулы: справочник / В.Т. Воднев. – Минск: Вышэйшая школа, 1988. – С. 170-176.

Перечень условных обозначений

β – угол между касательной к плоскости лопасти и направлением, обратным окружной скорости, град.;

c – скорость движения среды, м/с;

P – давление, Па;

r – радиус рабочего колеса, м;

ρ – плотность среды, кг/м³;

u – окружная скорость колеса, м/с;

w – относительная скорость среды, м/с;

ω – угловая скорость колеса, рад/с.

Индексы:

a – осевой, аксиальный;

m – среднее значение;

r – радиальный;

t – теоретический;

u – тангенциальный;

1 – вход в межлопастное пространство;

2 – выход из межлопастного пространства.

Pavlechko V.N., Kazachenko G.V.

Pressure of an axial blower as a function of a blade angle relative to the fluid flow direction

The equations for calculation of theoretical values of the axial, tangential, and radial velocities of a fluid and the velocity of a fluid relative to a rotor blade based on the blade angle along the fluid flow direction were obtained. The equations for calculation of the following theoretical pressures were derived: axial static pressure; tangential dynamic pressure; and radial pressure due to the centrifugal force. A ratio of the velocity of a fluid to the tangential velocity of a rotor and the generated pressure are presented graphically as functions of the blade angle along the flow direction. At small blade angles, the static pressure is mostly created. The maximum flow of the fluid is reached when a blade angle at the rotor outlet is equal to 58° . The pressure caused by the centrifugal force is significantly lower than the pressure created by the blades.

Поступила в редакцию 18.04.2016 г.

УДК 621.926.35:620.178.16(045)(476)

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ МЕЛЬНИЦ

Таболич А.В. (НТЦ ОАО «НПО Центр», г. Минск, Беларусь), Бондаренко С.Н. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

В статье рассматриваются перспективные конструкции ускорителей центробежно-ударных мельниц, которые при сохранении общей производительности и высокой эффективности процесса помола позволяют снизить эксплуатационные затраты за счет защиты рабочих элементов конструкции от износа. Приводятся сравнительные характеристики износа для ускорителей различных типов и анализ гранулометрического состава продуктов измельчения.

Введение

В настоящее время ударно-центробежные мельницы находят все более широкое применение для измельчения высокопрочных и абразивных материалов в технологиях обогащения руд и измельчения некоторых видов горных пород для строительной отрасли, успешно заменяя традиционно применяемые для этих целей шаровые мельницы [1, 2]. Измельчительное оборудование ударно-центробежного типа характеризуется достаточно низким энергопотреблением и относительно небольшим намолом материала размольной гарнитуры. При помоле в мельницах такого типа разрушение измельчаемого материала происходит по слабым связям, микротрещинам и граням спаянности, что позволяет получать целевой продукт с хорошо развитой поверхностью и зернами, имеющими выраженную изометрическую форму.

Однако, измельчение прочных горных пород, руд и материалов, обладающих высокой абразивностью, существенно повышает эксплуатационные затраты при производстве продуктов измельчения этих материалов. Значительный вклад в повышение эксплуатационных затрат при измельчении высокопрочных и абразивных материалов обусловлен очень высоким износом материалов рабочих органов размольной гарнитуры и, как следствие, необходимостью их частой замены. Для более эффективного использования в производстве ударно-центробежных мельниц необходимо предусмотреть ряд мер по защите от износа некоторых рабочих элементов мельницы, т.к. большие скорости вращения ускорителей и высокая скорость движения воздушного потока приводят к уменьшению ресурса конструкции и, соответственно, повышают эксплуатационные затраты.

Исследования, проведенные в данной работе, направлены на разработку эффективных конструкций ускорителей центробежно-ударных мельниц, которые при высокой эффективности общего процесса помола позволяют снизить эксплуатационные затраты.

Конструкционные особенности центробежно-ударных мельниц, производимых ОАО «НПО Центр»

Принцип действия центробежно-ударных измельчительных комплексов ОАО «НПО Центр» основан на разгоне частиц исходного материала до большой скорости

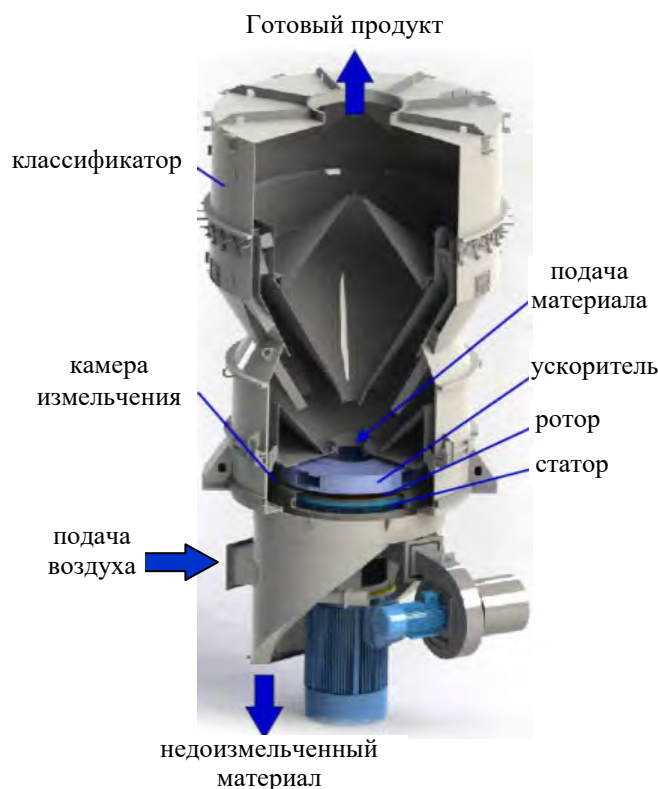


Рисунок 1. – Мельница центробежно-ударная

в межлопаточном пространстве ротора-ускорителя с последующим ударом об отражательные элементы. Схема работы самой центробежно-ударной помольной установки показана на рисунке 1.

Исходный материал поступает в центральную часть вращающегося ускорителя и, двигаясь по каналам от центра к периферии, разгоняется до скорости, обеспечивающей разрушение материала (85-120 м/с). При столкновении с отбойными элементами, расположенными на некотором расстоянии по периметру вокруг ускорителя, передняя часть частицы материала разрушается.

Измельченный материал подхватывается воздушным потоком, создаваемым вентилятором, и направляется в зону классификации, где происходит выделение фракций требуемой тонины, а недостаточно измельченный материал направляется обратно в ускоритель для дальнейшего измельчения.

Таким образом, в центробежно-ударной мельнице осуществляется непрерывный отвод измельченного до требуемой тонины материала и возврат крупных частиц на дополнительный помол. Крупность готового продукта может легко регулироваться в процессе измельчения без остановки работы оборудования.

Особенности футеровки рабочих элементов ускорителя

Как показывает практика, износ рабочих элементов измельчительных аппаратов за счет механических повреждений, обусловленных ударными, истирающими и налипаящими воздействиями, можно существенно уменьшить путем специальной отделки поверхностей этих рабочих элементов – так называемой футеровки. Футеровка позволяет значительно продлить срок службы помольных агрегатов, к тому же замена отделочного материала намного дешевле, чем полная замена рабочего элемента конструкции [3].

Анализ особенностей и практика эксплуатации различных помольных аппаратов позволяет сделать заключение, что не существует идеальных футеровочных материалов, которые смогли бы полностью исключить износ рабочих элементов конструкции [4]. У всех материалов для футеровки есть предельный ресурс. При помоле высокоабразивных материалов износ тем выше, чем интенсивнее воздействие частиц материала на элементы конструкции и выше общая производительность работы самого оборудования.

Поэтому на основании анализа практики эксплуатации помольного оборудования можно сделать заключение, что самым эффективным решением проблемы износа рабочих органов ударно-центробежных мельниц является недопущение непосредственного воздействия на них частиц измельчаемого материала. Этот эффект может быть достигнут за счет организации движения потока таким образом, чтобы измельчаемый материал попадал непосредственно не на рабочие элементы конструкции, а его течение происходило по такому же измельчаемому материалу, т.е. необходимо предусмотреть

схему футеровки рабочих органов самим измельчаемым материалом в режиме «самофутеровки».

В центробежно-ударной мельнице наиболее изнашиваемыми элементами являются: боковая обечайка, лопатки ускорителя и отбойные элементы. Замена отбойных элементов на специальные карманы, в которых залегают слой материала, широко применяется в стандартных конструкциях дробильного оборудования серийно выпускаемого ОАО «НПО Центр».

Такой способ защиты от износа довольно эффективен, однако подходит только для получения крупнодисперсных материалов с размером частиц свыше 1 мм.

При получении тонкодисперсных материалов удар о поверхность, образованную залегающим материалом, будет идти по касательной, в то время как отбойные элементы всегда можно установить нормально к траектории движения частиц.

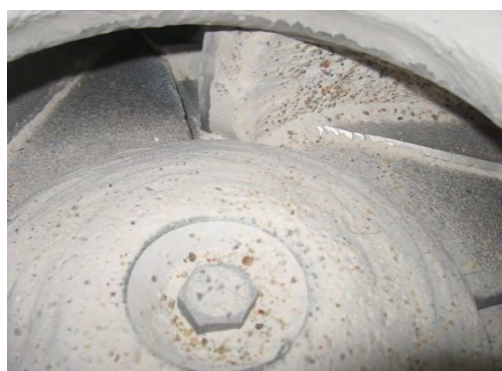


Рисунок 2. – Лопатка после самофутеровки измельчаемым материалом

Самофутеровка разгонных лопаток ротора измельчаемым материалом (рисунок 2) эффективно защищает разгонные лопатки ускорителя от износа. Выполнение лопатки ускорителя в виде сектора логарифмической кривой позволяет залегают части материала на его поверхности, и в дальнейшем прохождение материала при его разгоне в ускорителе происходит по слою уже залегающего ранее материала.

Однако необходимо отметить, что данная конструкция не лишена недостатков.

Во-первых, условие создания самофутерующего слоя предполагает такую форму лопаток ускорителя, при которой частицы материала на поверхности имеют нулевую скорость. После набора слоя самофутеровки наблюдается снижение скорости вылета частиц из ускорителя за счет реакции от изогнутого профиля лопатки с самофутеровкой и более высокого трения материала о материал, чем при трении материала о металл. Это приводит к снижению общей эффективности помола, увеличению циклической нагрузки и, как следствие – к снижению общей производительности.

Во-вторых, относительная сложность их изготовления, а так же более тяжелая конструкция ускорителя, что сказывается на стоимости изготовления и общих энергозатратах на помол.

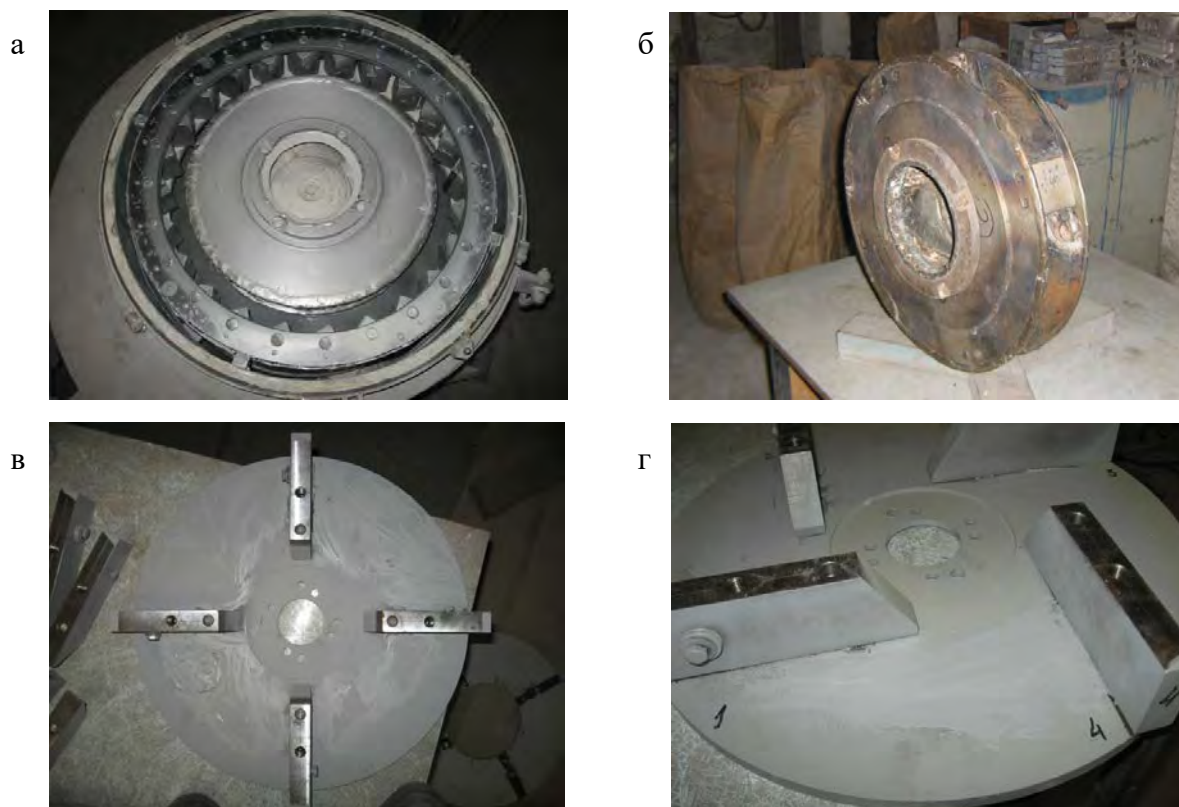
В-третьих, наличие боковой обечайки ускорителя, защита которой обычно осуществляется путем наплавки защитного слоя электродами из специальных устойчивых к износу сплавов. Эта поверхность работает в зоне, сложной с точки зрения износа. Материал, разогнанный в ускорителе, ударяется об отбойные элементы и зачастую не выносится сразу воздушным потоком, а ударяется о боковую поверхность ускорителя, что приводит к ее интенсивному износу.

Одним из вариантов решения этих проблем, стала так называемая «открытая» конструкция ускорителя, в которой не предусмотрено устройство боковой стенки, по-

этому материал, отлетая от отбойных элементов, попадает под удар частиц летящей ему навстречу основной массы разогнанного материала.

В такой конструкции ускорителя были использованы лопатки двух видов: прямые, с поверхностью из износостойких материалов, и в форме логарифмической кривой (аналогично закрытой конструкции).

Таким образом, главной целью проведенных экспериментов являлось сравнительное исследование ускорителей различной конструкции: закрытой (традиционной с лопатками в виде логарифмической кривой), открытой с прямыми лопатками, установленными под различным углом к оси вращения ускорителя, и открытой с лопатками в форме логарифмической кривой (рисунок 3).



а – закрытый ускоритель с отбойными элементами; б – открытый ускоритель с изогнутыми лопатками; в – открытый ускоритель с лопатками, установленными нормально к оси; г – открытый ускоритель с лопатками, установленными с наклоном вперед к оси по ходу вращения

Рисунок 3. – Различные типы ускорителей для исследований

Программа проведения исследований

Эксперименты по сравнительному исследованию различных типов ускорителей проводились в соответствии с предварительно разработанной программой исследований, содержание и условия реализации которой представлены в таблице 1. Материал, использованный для проведения исследований по измельчению – 100 % кварцевый песок фракции от 0 до 2,5 мм. Содержание фракции менее 0,5 мм в измельчаемом материале не превышает 10 %.

Для удобства отображения условий проведения исследований и соответствующих режимов работы технологического оборудования была введена система обозначений ускорителей, используемых в экспериментах.

Далее приводится введенное обозначение используемых ускорителей: ЗКС (закрытый), ОПС (открытый с лопатками вперед), ОНС (открытый с лопатками, расположенными нормально относительно оси вращения ускорителя), ОЗС (открытый с лопатками назад), ОЛС (открытый ускоритель с лопатками в виде логарифмической кривой).

Таблица 1. – Программа исследований

Описание работы	Условия проведения экспериментов	Контролируемые параметры
Исследование износостойкости основных элементов открытой и закрытой конструкций ускорителя	1. Технологические параметры: производительность 300 кг/ч. 2. Классификатор центробежный статический стандартной конструкции с поворотными лопатками. 3. Вентилятор транспортный, 3000 об/мин.	- обороты ускорителя; - рабочий ток; - расход воздуха; - гранулометрический состав материала; - износ элементов отбойной поверхности и ускорителя

Результаты исследований процесса износа элементов ускорителя

Износ элементов оценивался путем визуального осмотра и контролировался по потере веса элементов камеры измельчения путем взвешивания.

Для более четкого определения характера износа и обеспечения возможности сравнения показателей износа для разных типов ускорителей быстроизнашивающиеся элементы ускорителей были изготовлены из низкоуглеродистой стали без термообработки.

По результатам проведенных экспериментов износ подкладных листов, защищающих верхний и нижний диски закрытого ускорителя, практически не наблюдался; в закрытом ускорителе ЗКС и ускорителе ОЛС износ лопаток практически не наблюдался, т.к. вследствие конструктивных особенностей лопаток на них формируется слой материала, защищающий лопатки от износа. Износ элементов в открытом ускорителе идет более интенсивно т.к. рабочая поверхность не защищена слоем самофутерующего материала.



1 – лопатки, установленные назад относительно оси вращения ускорителя; 2 – установленные нормально; 3 – установленные вперед
Рисунок 4. – Износ лопаток ускорителя

Наибольший износ в открытом ускорителе наблюдался на лопатках. Износ лопаток, установленных вперед, нормально и назад относительно оси вращения ускорителя, показан на рисунке 4.

При всех углах установки лопаток наблюдался «чешуйчатый» характер износа. Это обусловлено направлением угла атаки частицами материала лопаток при их прохождении междискового пространства ускорителя, а так же характером движения пылевоздушного потока вдоль лопаток.

Сравнение характеристик износа различных типов ускорителей представлено в таблице 2 и на рисунке 5.

Таблица 2. – Сравнение характеристик износа различных типов ускорителей

Наименование параметра	Ускорители				
	ЗКС	ОНС	ОПС	ОЗС	ОЛС
Масса ускорителя перед экспериментом, кг	45,94	34,04	35,12	34,04	36,62
Масса суммарных потерь ускорителя, кг	0,26	0,50	0,22	0,50	0,11
Масса пропущенного материала, т	0,90	0,90	0,69	0,63	0,90
Масса износа ускорителя на тонну материала, кг	0,289	0,556	0,319	0,794	0,122
Износ относительно стандартного ускорителя ЗКС, %	100	192	110	275	42

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что наиболее защищенной от износа конструкцией является ОЛС (открытый ускоритель с лопатками в виде логарифмической кривой). Интенсивный износ в ней был замечен только на установленных по периферии ускорителя билах.

Износ конструкции ОЛС по сравнению со стандартной закрытой ЗКС конструкцией ускорителя менее интенсивный.

Выводы

По результатам экспериментов, проведенных для изучения показателей и особенностей процесса износа рабочих элементов ускорителей различной конструкции, было установлено, что относительно стандартного ускорителя ЗКС наименьший износ имеет ускоритель конструкции типа ОЛС (42 %). Наибольший износ показал ускоритель конструкции типа ОЗС (275 %); ускоритель типа ОПС показал износ, сопоставимый по величине с износом стандартного ускорителя типа ЗКС.

При анализе гранулометрического состава полученных продуктов было установлено следующее.

1. Материал с наиболее мелким гранулометрическим составом при одинаковом режиме работы центробежно-ударной мельницы можно получить при использовании открытой конструкции ускорителя с лопатками, установленными нормально к оси вращения. В этом случае режим помола требует меньших энергозатрат на процесс измельчения, чем при использовании ускорителя закрытой конструкции.

2. Самой эффективной с точки зрения износа является конструкция открытого ускорителя с лопатками, установленными с наклоном вперед по ходу вращения ОПС. Она обладает наименьшими энергозатратами на получение 1 см²/г удельной поверхности частиц измельчаемого материала. Однако при этом измельченный материал имеет более крупный гранулометрический состав по сравнению с ускорителем ОНС

Наименьший износ был зафиксирован в конструкции ОЛС. Главным преимуществом конструкции ОЛС по сравнению с открытыми конструкциями ускорителя с прямыми лопатками является отсутствие износа лопаток, которые защищаются самофутерующим слоем материала, что в разы повышает ресурс конструкции.

В среднем в открытом ускорителе ОЛС износ элементов ускорителя происходит медленнее более чем в 2 раза, чем в ускорителях закрытого типа, в 5 раз медленнее по

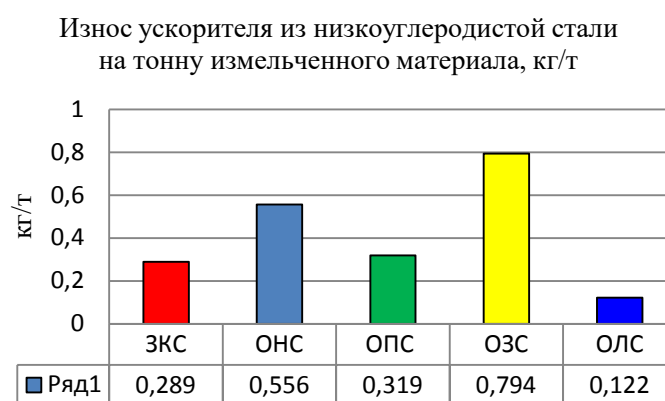


Рисунок 5. – Результаты исследований: сравнение характеристик износа

сравнению с ускорителями ОНС, в 2,5 раза медленней, чем в ОПС и в 7 раз – чем в ОЗС. Однако стоит отметить, что в процессе производства лопатки будут стандартно защищаться износостойким материалом, и разница в интенсивности износа будет значительно меньше.

Необходимо так же отметить, что ускоритель ОЛС имеет значительно меньшую стоимость изготовления по сравнению с традиционными ускорителями ЗКС. Это обусловлено отсутствием боковой обечайки (как следствие – отсутствие необходимости ее футеровки), общим облегчением конструкции и снижением трудозатрат на ее производство.

По сравнению с открытой конструкцией ускорителей с прямыми лопатками стоимость ускорителя ОЛС несколько выше за счет более сложного процесса изготовления лопаток. Однако эта разница компенсируется впоследствии за счет экономии на футеровке лопаток.

К недостатку конструкции ОЛС по сравнению со стандартным закрытым ускорителем можно отнести наличие более сильного вентиляторного эффекта, при котором часть энергии тратится на разгон воздушного потока в ускорителе. Поэтому при получении мелкодисперсных материалов такая конструкция будет более энергозатратной. Однако при измельчении цемента до требуемой нормативной крупности использование такой конструкции в производственном процессе вполне оправдано.

По результатам проведенных экспериментов были разработаны практические рекомендации по оптимизации параметров конструкции камеры измельчения, на основании которых в конструкторскую и технологическую документацию ударно-центробежных мельниц различных типоразмеров, производимых ОАО «НПО Центр», были внесены соответствующие изменения.

Список цитированных источников

1. **Баклашов, И.В.** Деформирование и разрушение породных массивов. Нормативные документы, регламентирующие прочность / И.В. Баклашов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
2. **Касаткин, А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии (глава XVIII. Измельчение, грохочение и дозирование твердых тел): учебник для вузов / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
3. Защитные футеровки и покрытия горно-обогатительного оборудования / А.А. Тарасенко [и др.]. – М.: Недра, 1985. – 211 с.
4. **Вайсберг, Л.А.** Новое оборудование для дробления и измельчения материалов / Л.А. Вайсберг, Л.П. Зарогатский // Горный журнал. – 2000. – № 3. – С. 49-52.

Tabolich A.V., Bondarenko S.N.

Design opportunities to improve wear resistance of accelerators of centrifugal impact mills

The article discusses a prospective design of accelerators, centrifugal impact mills that reduce operating costs by a wear protection of working components while maintaining an overall performance and a high efficiency of a grinding operation. Comparative wear characteristics for different types of accelerators and an analysis of granulometric composition of grinding products are given.

Поступила в редакцию 23.05.2016 г.

УДК 622.673.83-562(045)(476)

ПЕРЕДАЧА ТРЕНИЕМ УСИЛИЙ СО СТОРОНЫ БАРАБАНА (ШКИВА) НА ЛЕНТУ КОНВЕЙЕРА (РЕМНЯ)

Часть 1. Моделирование взаимодействия ленты с барабаном

Казаченко Г.В. (Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь)

Рассматривается взаимодействие ленты с барабаном на основании наиболее распространенного закона сухого трения и краевых условий. Получено новое решение известной задачи, учитывающее распределение нормальных давлений по дуге контакта ленты с барабаном. Предложены также формулы для определения скольжения ремня в зависимости от передаваемого усилия.

Введение

Методы расчета плоскоремennых передач и ленточных конвейеров базируются на известной формуле Леонарда Эйлера для определения силы трения нити о цилиндр при ее скольжении относительно последнего. Реальные условия работы подобных механизмов и их конструктивные исполнения существенно отличаются от схемы, рассмотренной Л. Эйлером. Вследствие этого применение этой формулы для расчетов часто приводит к результатам, несовпадающим с практическими данными. Поэтому не прекращаются попытки уточнения формулы Эйлера различными способами. История подобных попыток и дискуссий по теории ременных передач и ленточных конвейеров изложена в работе [1], где проведен обзор различных подходов к объяснениям и теориям таких передач, а также сделан вывод о необходимости дальнейших работ по этой проблематике, в том числе и экспериментальных. Анализируя эту работу, а также ряд других [2, 3], посвященных этой проблеме, мы пришли к выводу, что рассматриваемую задачу необходимо решать с учетом краевых условий на границах дуги контакта ленты с барабаном или шкива с ремнем. Это связано с тем, что на границах дуги контакта нормальное давление p ленты на шкив или барабан равно нулю. Этот факт никак не учитывается при выводе формулы Эйлера, где также не отражено влияние толщины ремня или ленты, их сопротивление изгибу. Учет этих факторов составляет основную задачу настоящего исследования.

Содержание исследований и некоторые результаты

Рассмотрим сначала вариант решения задачи без учета сопротивления ленты конвейера изгибу (опуская термины ремень и шкив и заменяя их равноценными терминами – лента и барабан). В дальнейших рассуждениях положим, что напряжение трения τ между лентой и барабаном связано с нормальным давлением p некоторой функциональной зависимостью (закон трения)

$$\tau = \varphi(p), \quad (1)$$

где φ – известная функция, соответствующая используемому закону трения;

p – давление между лентой и барабаном.

Не останавливаясь на конкретном виде этой зависимости, запишем условия равновесия элементарного объема ленты длиной $dl = r \cdot d\alpha$, высотой h и шириной b (рисунок 1).

Эти условия запишем в проекциях на касательную к дуге взаимодействия контактирующих сред и нормаль к ней. Эти условия хорошо известны и имеют вид

$$\begin{cases} p \cdot b \cdot r \, d\alpha - (2\sigma + d\sigma) \sin \frac{d\alpha}{2} b \cdot h = 0; \\ \tau \cdot b \cdot r \, d\alpha - d\sigma \cdot b \cdot h = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где p – давление со стороны шкива (барабана);

σ – нормальное напряжение в сечении ленты;

τ – напряжение трения между лентой и барабаном.

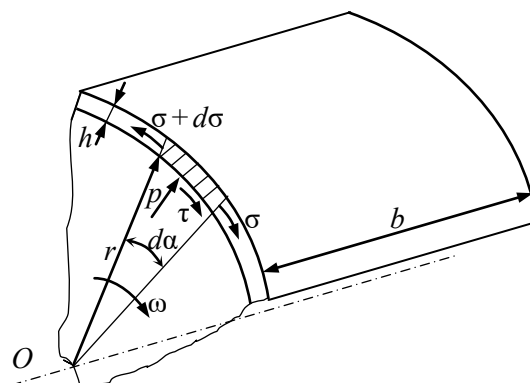


Рисунок 1. – Равновесие элементарного объема

Из первого уравнения, принимая $\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2}$ и пренебрегая малой величиной второго порядка малости $d\sigma \frac{d\alpha}{2}$, имеем

$$p \cdot r = \sigma \cdot h. \quad (3)$$

Это равенство не выполняется в точках соприкосновения ленты с барабаном на входе и выходе. Если принять, что трение подчиняется известному закону трения Кулона и выразить p из последнего соотношения

$$\tau = f \cdot \sigma \frac{h}{r}, \quad (4)$$

то, подставив это во второе уравнение системы (2), получим

$$f \cdot \sigma \frac{h}{r} b \cdot r \, d\alpha = d\sigma \cdot b \cdot h, \quad (5)$$

или

$$f d\alpha = \frac{d\sigma}{\sigma}. \quad (6)$$

Интегрируя это уравнение, как обыкновенное дифференциальное уравнение, с начальными условиями $\alpha_0 = 0$ и $\sigma_0 = \sigma_2$, приходим к известному решению

$$\sigma_{\alpha_k} = \sigma_2 \cdot e^{f\alpha}, \quad (7)$$

где α_k – угол обхвата барабана лентой;

σ_2 – напряжение в сечении ленты при ее сходе с барабана.

Поскольку сечение ленты постоянно, то последнее выражение трансформируют путем умножения на площадь сечения $b \cdot h$ ленты в соотношение между усилиями натяжения ленты при ее входе на барабан и сходе с него

$$S_1 = S_2 \cdot e^{f\alpha_k}, \quad (8)$$

где S_2 и S_1 – усилия в ленте, соответственно, при ее сходе с барабана и входе на него.

Однако, соотношения (7) и (8) входят в противоречие с физическим смыслом задачи о взаимодействии ленты с барабаном. Действительно, если учесть, что соглас-

но (5) $\sigma = \frac{p \cdot r}{h}$, то принимая во внимание, что $r = \text{const}$ и $h = \text{const}$, формально приходим к соотношению

$$p_1 = p_2 \cdot e^{f\alpha_\kappa}, \quad (9)$$

тогда как на самом деле p_1 и p_2 в точках входа и выхода ленты из контакта с барабаном равны нулю. Чтобы избежать этого противоречия вернемся к уравнениям равновесия и, учитывая, что $\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{dp}{p}$, запишем (5) в виде $\frac{dp}{p} = f d\alpha$.

Для этого дифференциального уравнения задачу решения можно формулировать как краевую с условиями:

$$\begin{aligned} \text{при } \alpha = 0, \quad p &= 0; \\ \text{при } \alpha = \alpha_\kappa, \quad p &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Кроме того, распределение и величина нормальных давлений должны удовлетворять уравнениям равновесия барабана во вращательном движении, которые (рисунок 2) можно записать, учитывая, что крутящий момент уравновешивается моментом равнодействующей сил трения, в следующей форме

$$\int_0^{\alpha_\kappa} \tau \cdot b \cdot r d\alpha \cdot r = r(S_1 - S_2), \quad (11)$$

или

$$\int_0^{\alpha_\kappa} \tau d\alpha = \frac{S_1 - S_2}{b \cdot r}. \quad (12)$$

Так как по условию $\tau = \varphi(p)$ и φ – известная функция, то для вычисления интеграла $\int_0^{\alpha_\kappa} \varphi(p) d\alpha$ необходимо знать закон распределения нормального давления по дуге

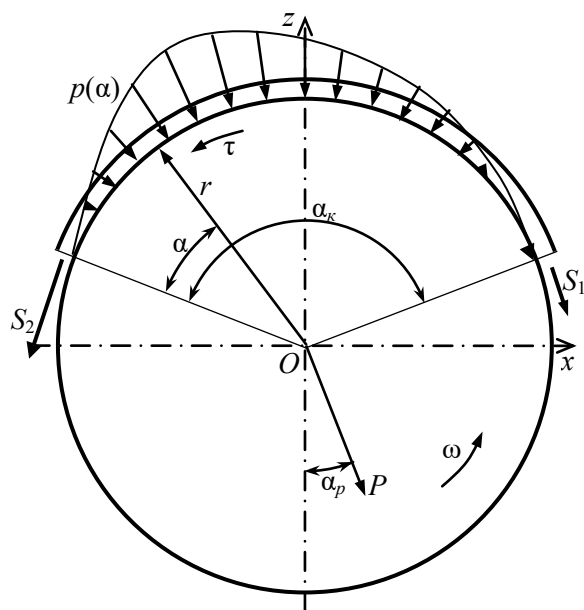


Рисунок 2. – К определению зависимости p от α

контакта ленты с барабаном. Этот закон необходим также и для нахождения силы P – равнодействующей элементарных сил давления ленты на барабан. Разлагая эту силу на составляющие вдоль осей Ox и Oz и определив ее величину через усилия S_1 и S_2 , запишем (рисунок 2)

$$\begin{cases} P_x = (S_1 - S_2) \cos \frac{\alpha_\kappa}{2}; \\ P_z = (S_1 + S_2) \sin \frac{\alpha_\kappa}{2}; \\ P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} \right)}. \end{cases} \quad (13)$$

Проекции P_x и P_y и их равнодействующую P можно выразить также через давление ленты на барабан

$$\begin{cases} P_x = b \cdot r \int_0^{\alpha_k} p \sin \frac{\alpha_k}{2} d\alpha; \\ P_y = b \cdot r \int_0^{\alpha_k} p \cos \frac{\alpha_k}{2} d\alpha; \\ P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} = b \cdot r \int_0^{\alpha_k} p d\alpha. \end{cases} \quad (14)$$

Направление равнодействующей P определяется углом α_p ее отклонения от оси Oz

$$\alpha_p = \arccos \frac{(S_1 + S_2) \sin \frac{\alpha_k}{2}}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right)}}. \quad (15)$$

Закон изменения нормального давления по дуге контакта ленты с барабаном должен удовлетворять краевым условиям (12), а также соотношениям (14) и (15). Задачу определения этого закона можно решать на основе методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений с краевыми условиями. В то же время для ее решения можно использовать условие равновесия барабана. В качестве зависимости нормального давления p от угла α контакта ленты с барабаном можно взять параболу второго порядка

$$p = a_1 \cdot \alpha^2 + b_1 \cdot \alpha + c_1, \quad (16)$$

где a_1, b_1, c_1 – размерные коэффициенты, подлежащие определению из краевых условий и условий равновесия.

Так как при $\alpha = \alpha_k$ $p = 0$, то заключаем, что коэффициент c_1 также равен нулю. С другой стороны, при этих же условиях с учетом того, что $c_1 = 0$, можно записать, что при $\alpha = \alpha_k$

$$a_1 \cdot \alpha_k + b_1 = 0, \quad (17)$$

откуда получим соотношение между a_1 и b_1

$$a_1 = -\frac{b_1}{\alpha_k}. \quad (18)$$

Так как согласно (14) и (16)

$$P = b \cdot r \int_0^{\alpha_k} p d\alpha = b \cdot r \int_0^{\alpha_k} (a_1 \cdot \alpha^2 + b_1 \cdot \alpha) d\alpha = b \cdot r \left(\frac{1}{3} \alpha_k^3 \cdot a_1 + \frac{1}{2} \alpha_k^2 \cdot b_1 \right), \quad (19)$$

то с учетом (13) и (18) имеем

$$\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right)} = \frac{1}{6} b \cdot r \cdot \alpha_k^2 \cdot b_1. \quad (20)$$

Отсюда находим значение коэффициента b_1 и, подставив это значение в (18), определяем также и коэффициент a_1

$$\begin{cases} b_1 = -\frac{6 \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2 S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} \right)}}{b \cdot r \cdot \alpha_\kappa^2}; \\ a_1 = -\frac{6 \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2 S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} \right)}}{b \cdot r \cdot \alpha_\kappa^3}. \end{cases} \quad (21)$$

Окончательно зависимость нормальных давлений между барабаном и лентой после подстановки (21) в (16) имеет вид

$$p = \frac{6 \alpha (\alpha_\kappa - \alpha)}{b \cdot r \cdot \alpha_\kappa^3} \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2 S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} \right)}. \quad (22)$$

В реальных конструкциях ленточных конвейеров часто встречаются ситуации, когда $\alpha_\kappa = \pi$, тогда последняя формула упрощается

$$p = \frac{6 \alpha (\pi - \alpha)}{b \cdot r \cdot \pi^3} (S_1 + S_2). \quad (23)$$

Перейдем теперь к определению суммарной силы трения между лентой и барабаном. Очевидно, что эта сила зависит от величины нормального давления и закона трения. Если принять закон трения в самом распространенном варианте $\tau = f \cdot p$, то в соответствии с расчетной схемой (рисунки 1, 2)

$$S_1 - S_2 = b \cdot r \int_0^{\alpha_\kappa} f \cdot p \, d\alpha. \quad (24)$$

Подставив в (24) значение p и проведя интегрирование, получим

$$S_1 - S_2 = f \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2 S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_\kappa}{2} \right)}. \quad (25)$$

Эта зависимость определяет предельное значение передаваемого окружного усилия в неявном виде и может быть использована для нахождения величины необходимого усилия S_2 при заданном или расчетном значении S_1 .

При $\alpha_\kappa = \pi$ зависимость (25) примет вид

$$S_1 - S_2 = f (S_1 + S_2), \quad (26)$$

или в разрешенном относительно S_1 виде

$$S_1 = S_2 \frac{1+f}{1-f}. \quad (27)$$

Эта формула широко известна и хорошо подтверждается.

Ее иллюстрация в виде отношения усилия в набегающей ветви ленты к усилию в сбегавшей ветви представлена на рисунке 3.

Если теперь вернуться к (25) и возвести его левую и правую части в квадрат, то после несложных преобразований получается квадратное уравнение следующего вида

$$S_1^2 - \frac{2 S_1 \cdot S_2}{1 - f^2} \left(1 - f^2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right) \right) + S_2^2 = 0. \quad (28)$$

Решая его относительно S_1 имеем

$$S_1 = \frac{S_2}{1 - f^2} \left[\left(1 - f^2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right) \right) + \sqrt{\left(1 + f^2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right) \right)^2 - (1 + f^2)^2} \right]. \quad (29)$$

Эта формула позволяет находить предельное значение усилия в набегавшей на ведущий барабан ветви конвейера в зависимости от коэффициента трения f ленты о барабан, угла контакта ленты с барабаном α_k и величины натяжения сбегавшей ветви S_2 .

Соотношения (25-27) не дают ответа о влиянии скорости скольжения на величину сил трения, т.е., строго говоря, они справедливы при полном скольжении ленты по барабану. Поэтому был принят ряд попыток установить это влияние путем разбития длины контакта ленты с барабаном на дуги скольжения и покоя. Представляется целесообразным использовать модель трения, предложенную в [4] и выражающую применительно к рассматриваемому процессу формулой

$$S_1 - S_2 = T = f \cdot P \frac{v_c}{\sqrt{v_c^2 + k \cdot p^2 (v - v_c)^2}}, \quad (30)$$

где v_c – скорость скольжения ленты о шкив;

k – некоторый коэффициент пропорциональности, учитывающий деформации материалов ленты и барабана и требующий опытного определения;

v – окружная скорость поверхности барабана, $v = \omega \cdot r$;

ω – угловая скорость вращения барабана;

T – суммарная сила распределенных по поверхности контакта элементарных сил трения.

Скорость ленты конвейера

$$v_{\text{л}} = v - v_c = v \left(1 - \frac{v_c}{v} \right). \quad (31)$$

Обозначим отношение

$$\frac{v_c}{v} = \varepsilon, \quad (32)$$

где величину ε называют коэффициентом скольжения [5].

Тогда путем несложных преобразований зависимость (30) можно привести к виду

$$T = f \cdot P \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 + k^2 \cdot p^2 (1 - \varepsilon)^2}}. \quad (33)$$

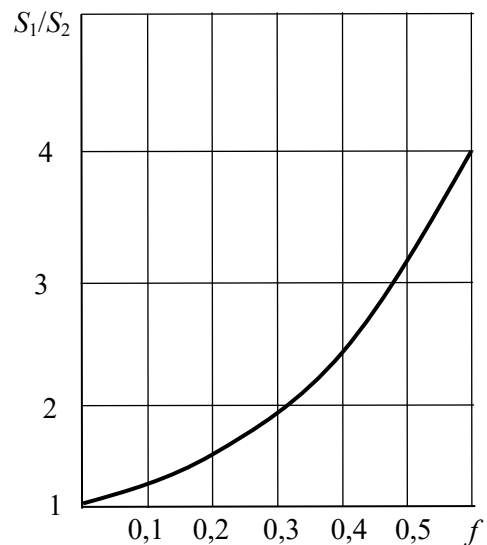


Рисунок 3. – Зависимость отношения натяжений ленты от коэффициента трения

Эта зависимость указывает на то, что скольжение ленты по барабану всегда сопровождается передачу усилия трения от барабана на ленту конвейера. Из нее путем возведения в квадрат левой и правой частей можно получить квадратное уравнение относительно коэффициента скольжения ε

$$\varepsilon^2 (f^2 \cdot P^2 - T^2 - k^2 \cdot T^2 \cdot P^2) + 2k^2 \cdot T^2 \cdot P^2 \cdot \varepsilon - k^2 \cdot T^2 \cdot P^2 = 0. \quad (34)$$

Решение этого уравнения

$$\varepsilon = \frac{-k^2 \cdot T^2 \cdot P^2 + k \cdot T \cdot P \sqrt{f^2 \cdot P^2 - T^2}}{f^2 \cdot P^2 - T^2 - k^2 \cdot T^2 \cdot P^2}. \quad (35)$$

При малых значениях коэффициента ε , что имеет место в реальных условиях эксплуатации ленточных конвейеров и плоскоремённых передач, можно пользоваться упрощенным вариантом формулы (35)

$$\varepsilon = \frac{k \cdot T \cdot P \cdot v}{\sqrt{f^2 \cdot P^2 - T^2}}. \quad (36)$$

Коэффициент ε целесообразно представить в виде зависимости от усилий S_1 и S_2 . Подставив в (36) значения p и T , получим

$$\varepsilon = \frac{k (S_1 - S_2) v \cdot \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + 2S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right)}}{\sqrt{f^2 \left(S_1^2 + S_2^2 + 2S_1 \cdot S_2 \left(\sin^2 \frac{\alpha_k}{2} - \cos^2 \frac{\alpha_k}{2} \right) \right) - (S_1 - S_2)^2}}. \quad (37)$$

При $\alpha_k = \pi$ эта зависимость принимает вид

$$\varepsilon = \frac{k (S_1^2 - S_2^2) \omega \cdot r}{\sqrt{f^2 (S_1 + S_2)^2 - (S_1 - S_2)^2}}. \quad (38)$$

Заключение

Предложенные зависимости позволяют сформировать методику расчета ведущих частей ленточных конвейеров и плоскоремённых передач. Однако для ее реализации надо знать значение коэффициента пропорциональности k между относительными скоростями деформаций материалов контактирующих сред, нагрузкой между ними, а также скоростью движения этих частей. Естественно, что это требует выполнения специальных экспериментов. Кроме того, предложенные зависимости не учитывают затрат энергии на деформирование ленты, что, на наш взгляд, не позволяет ее использовать при расчетах мощных современных конвейеров с металлической армированной лентой. Комплекс этих вопросов требует специальных исследований и разработки методики расчета подобных механизмов, а также создания специального стенда и методик определения коэффициентов k и f . Результаты этих исследований будут приведены во второй части настоящей статьи.

Список цитированных источников

1. **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.
2. **Лубенец, Н.А.** Прямой метод определения коэффициента трения конвейерной ленты о барабан / Н.А. Лубенец // Научный вестник НГУ. – 2010. – № 11-12. – С. 27-31.
3. **Пожелко, В.И.** Силовые закономерности упруго-деформируемой ременной передачи / В.И. Пожелко // Известия Челябинского научного центра. – 2000. – Вып. 3. – С. 56-62.
4. **Казаченко, Г.В.** О силе трения при плоском контакте трущихся тел / Г.В. Казаченко // Горная механика. – 2006. – № 4. – С. 69-72.
5. **Казаченко, Г.В.** Опорно-ходовые устройства горных машин / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Е.В. Щерба. – Минск: Энергопринт, 2016. – 208 с.

Kazachenko G.V.

Friction force transmission of a drum (pulley) on a conveyor belt (belt). Part 1. Modeling of the interaction of a tape with a drum

The article studies an interaction of a tape with a drum on the basis of the most common law of dry friction and boundary conditions. A new solution of a common problem has been obtained. It considers a distribution of normal pressure along the arc of contact of a tape with a drum. A formula for determining of a belt creep depending on transmitted force has been proposed.

Поступила в редакцию 23.05.2016 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.7+678.5(035.3)

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ И МОДИФИЦИРОВАННЫХ КОРОТКОИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КОМПОНЕНТОВ

Сорокин В.Г.¹, Авдейчик С.В.², Антонов А.С.², Ищенко М.В.³, Струк В.А.¹, Сазонко Г.Г.¹

¹УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», г. Гродно, Беларусь

²ООО «Молдер», г. Гродно, Беларусь

³ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Беларусь

Исследовано влияние короткоимпульсного лазерного излучения с различной энергией импульса на параметры структуры, морфологии и энергетического состояния компонентов, используемых для получения функциональных материалов на основе полимерных матриц. Установлено различие действия низкоэнергетического и высокоэнергетического потоков на преобладающие механизмы трансформирования поверхностных слоев дисперсных частиц, волокнистых, пленочных компонентов. Показаны направления эффективного использования модифицированных лазерным излучением компонентов при создании материалов для статических и динамических (триботехнических) металлополимерных систем.

Введение

Композиционные материалы на основе полимерных матриц с заданными параметрами эксплуатационных характеристик относятся к числу перспективных направлений современного материаловедения [1-5]. Композиты, содержащие функциональные компоненты различного состава, строения, различной дисперсности и технологии получения, позволяют создать герметизирующие и триботехнические комплектующие металлополимерных статических (адгезионных, уплотнительных) и динамических (триботехнических) систем, параметры которых обеспечивают эксплуатационный ресурс в соответствии с техническими требованиями без ремонта и обслуживания.

Параметры деформационно-прочностных, триботехнических и адгезионных характеристик композитов на основе полимерных, олигомерных и совмещенных матриц определяются, преимущественно, структурой межфазных слоев, кинетика и механизм формирования которых [1-4] зависят от энергетического состояния компонентов. Для активации компонентов в процессах межфазных взаимодействий используют различные методы технологического воздействия, обеспечивающие образование активных центров различного вида, способных к взаимодействию с образованием физических и химических связей.

К числу перспективных технологий модифицирования компонентов относится воздействие лазерным излучением с заданными энергетическими параметрами, которое изменяет структуру, строение и энергетическое состояние поверхностных слоев дисперсных частиц и субстратов [2-9]. Как правило, используют лазерное излучение (ЛИ)

большой энергии, которое определяет интенсивные процессы деструкции и сублимации полимерных полуфабрикатов, вследствие чего формируются условия для образования покрытий на твердых субстратах и высокодисперсных продуктов, которые используют по различному назначению [1]. Влияние низкоэнергетических потоков короткоимпульсного ЛИ на параметры структурных, деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик компонентов металлополимерных систем исследовано фрагментарно, что не позволяет разработать технологические рекомендации для применения этого эффективного метода модифицирования в материаловедении полимерных функциональных композитов.

Основная часть

Цель работы состояла в исследовании механизмов и кинетики изменения структуры, морфологии и энергетического состояния компонентов материалов и металлополимерных систем при воздействии короткоимпульсного лазерного излучения различной интенсивности.

Методика исследований. В качестве матричных полимеров для получения композиционных материалов различного функционального назначения были выбраны многотоннажные термопласты класса полиолефинов (ПЭНД, ПЭВД, ПП), полиамидов (ПА6, ПА6.6), полиэфиров (ПЭТФ), фторопластов (ПТФЭ) в состоянии промышленной поставки в соответствии с технической нормативной документацией предприятий-производителей ОАО «Полимир», ОАО «Гродно Азот», ОАО «Химволокно» (г. Могилев).

Для модифицирования базовых матриц использовали дисперсные и волокнистые компоненты различного состава, строения и технологии получения: кремнийсодержащие частицы микрометровой размерности (глина, трепел, шунгит), углеродсодержащие продукты (графит, технический углерод), продукты детонационного синтеза (УДАГ, УДА), продукты термогазодинамического синтеза ПТФЭ (УПТФЭ), фрагменты стеклянного (СВ) и углеродного (УВ) волокон (ОАО «СветлогорскХимволокно», ОАО «НовополоцкХимволокно»).

Модифицирующие компоненты различной дисперсности подвергали активации на воздухе и в жидкофазных средах при воздействии энергетических потоков: тепловых $673 \div 1373$ К, лазерного излучения с различной продолжительностью импульса $0,8 \div 2,0$ мкс и энергией импульса $0,5 \div 7$ мДж.

Для модифицирования компонентов материалов и металлополимерных систем использовали лазерную установку типа Квант-15 и ГОР-10N. Физико-химические процессы в поверхностных слоях компонентов и на границе раздела «матрица - наполнитель», «покрытие - субстрат» оценивали с использованием методов ИК-спектроскопии (Tensor-27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон-2,0, Дрон-3,0), ДТА (Thermoscan-2) по общепринятым методикам. Морфологические параметры частиц и компонентов металлополимерных систем, подвергнутых энергетическому воздействию, исследовали с применением атомно-силового (NT-206), растрового электронного (Mira, Tescan), оптического (MDS) микроскопов. Параметры энергетических характеристик частиц и субстратов исследовали методом спектроскопии термостимулированных токов (ТСТ) на оригинальной установке ОДО «Микротестмашины».

Результаты и обсуждения

Анализ литературных источников, посвященных материаловедению и технологии полимерных композитов и металлополимерных систем, выполненных научными школами академика НАН РБ Белого В.А., чл.-кор. Рогачева А.В., проф. Пинчука Л.С.,

проф. Иванова А.Ю., академика РАН Бузника В.М., свидетельствует о превалировании двух видов энергетического воздействия, обеспечивающего зарядовую активность в процессах межфазных взаимодействий, приводящих к образованию граничных слоев оптимальной структуры, которые определяют параметры деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик – термического в диапазоне температур $373\div 773$ К и лазерного в диапазоне энергий $0,5\div 500$ мДж. Интенсивность энергетического воздействия определяет характерные параметры структуры поверхностного слоя, морфологии и энергетических характеристик, поэтому существенный научный и практический интерес представляет как низко- так и высокоэнергетическое модифицирование исходных компонентов материалов и металлополимерных систем.

Исследовано влияние низкоэнергетического лазерного излучения на параметры структуры, морфологии и энергетического состояния полимерных компонентов класса термопластов, широко применяемых в материаловедении адгезионных, герметизирующих и триботехнических систем. Установлен эффект комплексного действия ЛИ с мощностью (интенсивностью) дозы в диапазоне $0,5\div 30$ Вт/см², проявляющийся в изменении молекулярного строения, надмолекулярной структуры, морфологии поверхностного слоя и энергетического состояния пленочных образцов из полиолефинов (ПЭВД, ПЭНД, ПП) и полиэфиров (ПЭТФ).

Воздействие лазерного излучения с длиной волны $\lambda_0 = 0,69342$ мкм, длительностью импульса $1,2\div 2,0\cdot 10^{-1}$ с и $\lambda_0 = 1,06$ мкм, с энергией $0,6\div 30$ Дж приводит к появлению характерного рельефа поверхностного слоя, образованного нанокompонентами в размерном диапазоне $1\div 100$ нм (рисунок 1).

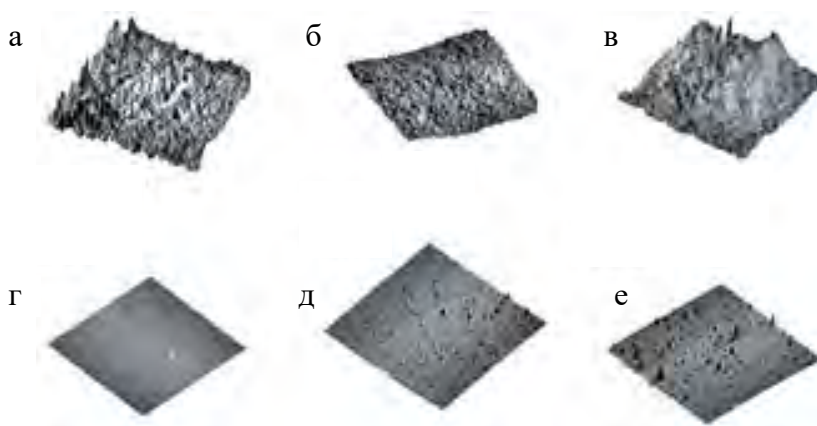
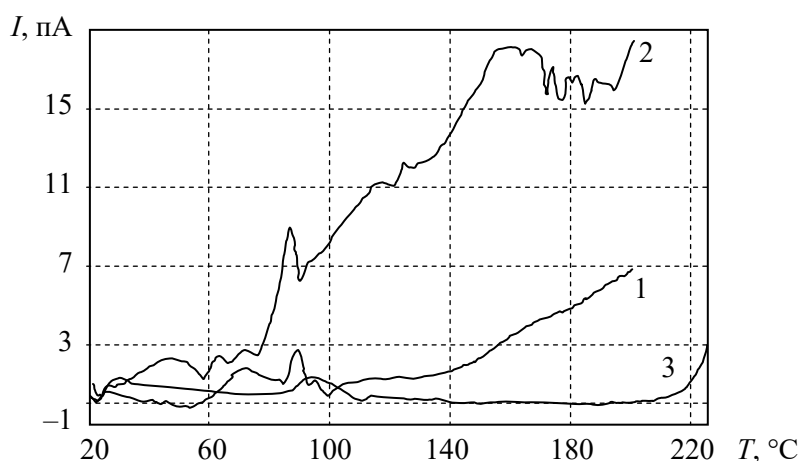


Рисунок 1. – Характерная морфология пленки ПЭВД (а, б, в), ПТФЭ (г, д, е), исходных (а, г) и подвергнутых лазерному излучению с энергией 30 Дж (б), 2 Дж (в) и напряжением на накопителе 500 В (д), 600 В (е). Однократный импульс продолжительностью 1,2 мс

Образование подобных компонентов обусловлено процессами перекристаллизации под действием акустических волн, возникающих при взаимодействии короткоимпульсного ЛИ с полимерной матрицей. Проявление эффекта свелинга (swelling) и бампинга (bumping) [5, 6] зависит от энергии импульса и вида подложки. При увеличении энергии импульса свыше некоторого предела наблюдается сглаживание нанорельефа. На светоотражающих подложках (Al) одинаковая по энергии доза ЛИ оказывает меньшее модифицирующее действие по сравнению со светопоглощающей подложкой. Интенсивное энергетическое воздействие обуславливает процессы изменения структуры и строения молекулярных цепей. В ИК-спектрах ПЭВД после ЛИ появляются полосы поглощения в области $600\div 800$ см⁻¹, $1600\div 1750$ см⁻¹, и наблюдается перераспределение интенсивности полос в области 1300 см⁻¹.

Комплексное воздействие ЛИ различной интенсивности приводит к изменению энергетического состояния поверхностного слоя полимерного образца и появлению электретов с большим временем релаксации, очевидно связанных с протеканием локальных процессов деструкции наиболее напряженных участков макромолекул с образованием различных продуктов, формированием ловушек носителей заряда благодаря десорбции низкомолекулярных продуктов и протеканию процессов синтеза (рисунок 2). Установлены эффекты, проявляющиеся в изменении параметров деформационно-прочностных, реологических и энергетических характеристик полимерных субстратов, которые могут быть использованы для модифицирования компонентов материалов и металлополимерных статических и динамических систем.



1 – светоотражающая подложка; 2 – светопоглощающая подложка; 3 – исходный образец
Рисунок 2. – Зависимость величины термостимулированных токов I от температуры T в образце ПЭВД, подвергнутом однократной обработке ЛИ с энергией $E \sim 0,6$ Дж

Особый интерес представляет технология лазерного модифицирования для обработки дисперсных частиц, используемых в композиционном материаловедении для направленного регулирования параметров эксплуатационных характеристик изделий (предела прочности при растяжении σ_p , предела прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, удельной ударной вязкости UUB , коэффициента трения f_{mp} , интенсивности изнашивания J). Комплексное действие ЛИ на частицы различных составов, строения и технологии получения обуславливает формирование развитой морфологии поверхностного слоя, активность которого в межфазных процессах взаимодействия увеличивается по сравнению с исходными частицами вследствие реализации механической составляющей адгезии и структурного упорядочения макромолекул связующего в граничных слоях. Проведенные исследования морфологических особенностей и энергетического состояния частиц углерода и кремнийсодержащих соединений (графит, УДАГ, УВ, глина, трепел), нашедших наиболее широкое распространение в функциональном материаловедении, свидетельствуют (рисунки 3, 4) о возможности реализации феномена наносостояния, который приводит к синергическим эффектам.

Частицы слоистых компонентов различного состава под действием высокоэнергетического потока ЛИ диспергируются вследствие разрушения по плоскостям спайности под действием термических напряжений, процессов дегидратации и дегидроксидации.

Лазерное воздействие может быть осуществлено как в воздушной среде, так и жидкофазной среде, содержащей функциональные компоненты различного состава и механизма действия. Например, диспергирование частиц слоистых минералов (глин) и графита в водных растворах мономеров (ϵ -капролактама) или терморазлагающихся со-

единений ($\text{Cu}(\text{HCOO})_2$) позволяет осуществлять комплексное модифицирование вследствие адсорбции молекул или наноразмерных частиц металлов на ювенильных поверхностях, образующихся вследствие термической деградации полуфабриката.

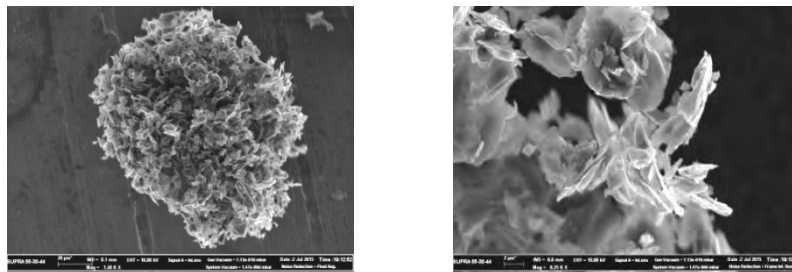


Рисунок 3. – Характерная морфология частицы графита марки С-1, подвергнутой воздействию 5 импульсов ЛИ с энергией 140 мДж и длительностью 1÷2 мс

Особый научный и практический интерес представляет воздействие ЛИ на волокна УВ, которые нашли широкое применение при создании высокопрочных износостойких композиционных материалов на основе олигомерных (ФФС, ЭС, НПЭС) и полимерных (ПА6, ПТФЭ) матриц.

Существенным недостатком УВ, снижающим эффективность модифицирующего действия в полимерных и олигомерных матрицах, является выраженная инертность в процессах межфазных взаимодействий, которая обусловлена характерными особенностями строения макромолекулы и технологией получения методом пиролиза полуфабрикатов [1]. Функциональное модифицирование УВ с целью повышения их активности в межфазных взаимодействиях представляет сложную задачу, решение которой сопряжено с использованием дорогостоящего специального оборудования [1, 3].

Рассмотрены особенности действия короткоимпульсного ЛИ на структуру, морфологию и энергетическое состояние волокон УВ и целлюлозы. Установлен эффект диспергирования поверхностного слоя, обусловленный процессами абляции и термической деградации (рисунок 4). В результате действия ЛИ поверхностный слой УВ приобретает характерную морфологию (рисунки 4г-4е), сформированную сочетанием наноразмерных компонентов.

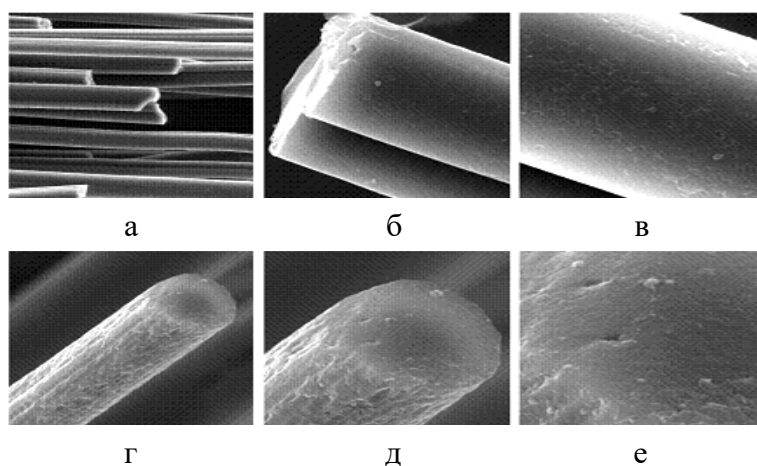


Рисунок 4. – Морфология фрагментов механической резки УВ исходных (а, б, в) и обработанных ЛИ с длиной волны $\lambda_0=1,06$ мкм и напряжением накопителя 900 В. Число импульсов 10 ед.

Отмечены эффекты деградации фрагментов УВ с образованием сквозных трещин в теле волокна.

Характер морфологии поверхностного слоя УВ зависит от энергии ЛИ (напряжения на накопителе, числа импульсов). Однако даже при воздействии одного импульса высокоэнергетического ЛИ в поверхностном слое протекают процессы абляции, которые приводят к образованию наноразмерных дефектов 20-50 нм и сквозных трещин, свидетельствующих о процессах глубокого разрушения (рисунки 5г-5е). Увеличение числа импульсов вызывает образование продуктов, которые концентрируются на поверхности волокнистого фрагмента с формированием специфичного рельефа (рисунки 5ж-5и). При этом значительно увеличивается число трещин с длиной 100÷200 нм и шириной 10÷20 нм.

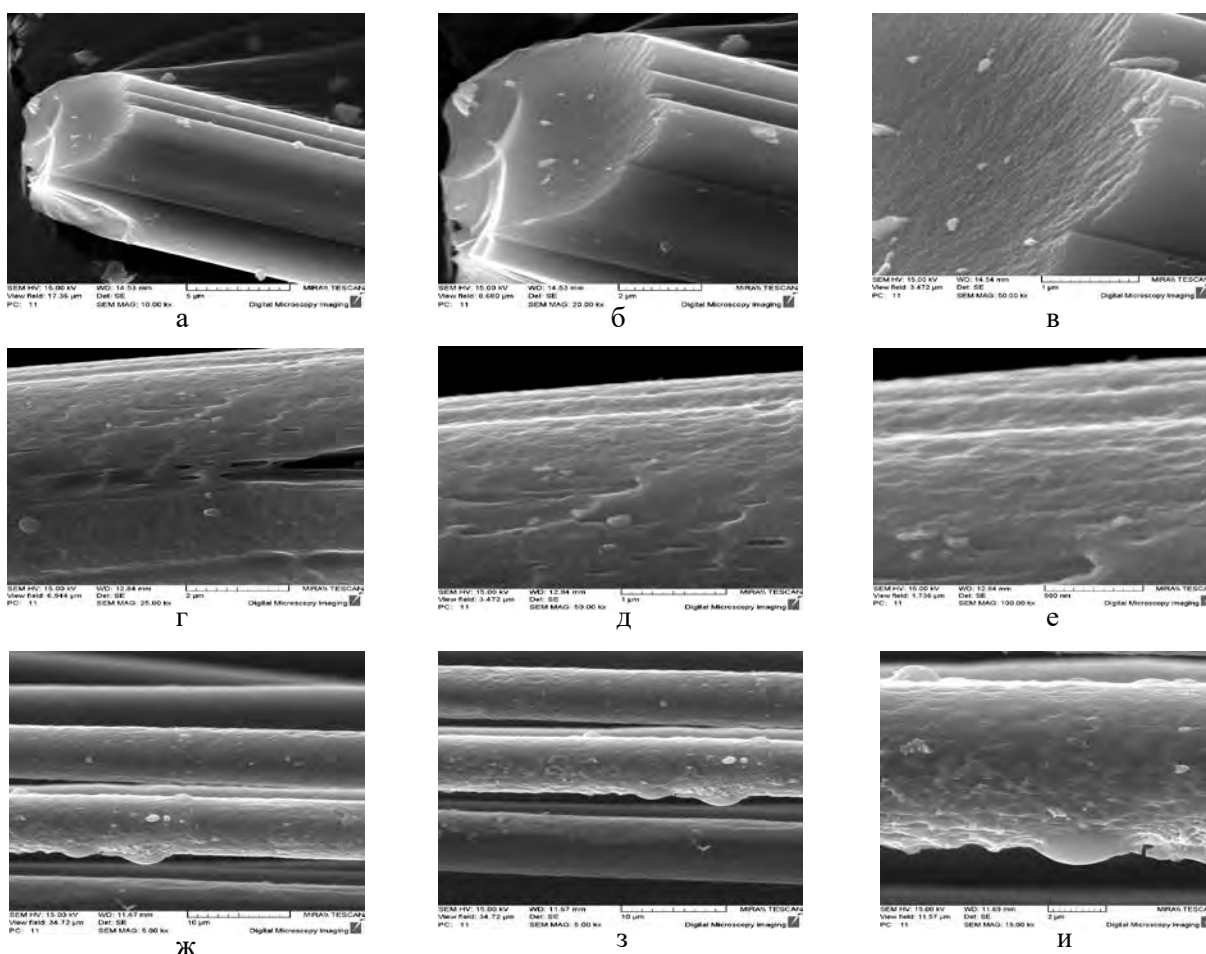


Рисунок 5. – Морфология поверхностного слоя УВ исходного (а, б, в) и обработанного короткоимпульсным ЛИ с напряжением на накопителе 800 В однократно (г, д, е) и 5-тикратно (ж, з, и)

Развитая морфология и наличие полостей способствуют увеличению механической составляющей адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица - УВ». Модифицированные короткоимпульсным ЛИ УВ приобретают повышенную склонность к процессам диспергирования при использовании механических измельчителей ножевого и ударного действия. Протекание процессов сублимации и термической деградации УВ способствует протеканию хемосорбционного взаимодействия функциональных модификаторов, предварительно нанесенных на волокнистый полуфабрикат.

Фрагменты УВ, обработанные раствором фторсодержащих олигомеров («Фолеокс», «Эпилам»), после лазерного модифицирования короткоимпульсным излучением при напряжении на накопителе $E_n = 500 \div 900$ В приобретают повышенную совместимость с матрицей политетрафторэтилена и могут быть использованы для получения композитов с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, превышающими параметры промышленных аналогов «Флубон», «Флувис».

Важнейшим фактором лазерного модифицирования полуфабрикатов различного состава, строения и дисперсности является изменение энергетических характеристик, оцениваемых по параметру ТСТ.

Короткоимпульсная обработка ЛИ дисперсных частиц глин, трепела, графита и фрагментов углеродных и целлюлозных волокон приводит к увеличению активности в диапазоне температур $303 \div 623$ К.

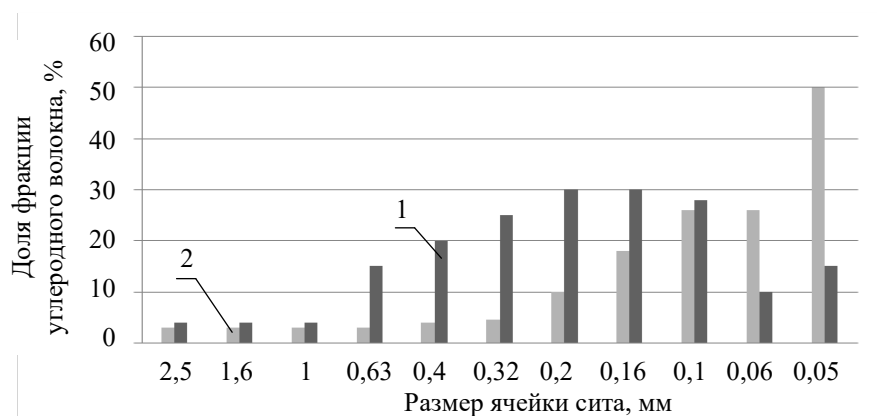
Наличие активного состояния у части наполнителей увеличивает интенсивность межфазных взаимодействий в композитах по механизму структурного упорядочения граничных слоев [4] и фильтрующую способность пористых систем, выполненных из волокнистых материалов.

Проведенные исследования позволили разработать рекомендации для выбора технологических параметров получения компонентов функциональных материалов на основе термопластичных матриц и металлополимерных узлов различного конструктивного исполнения.

Для модифицирования матриц фторсодержащих полимеров (ПТФЭ), отличающихся отсутствием выраженного вязко-текучего состояния и инертностью в процессах межфазных взаимодействий, разработана технология получения дисперсных фрагментов УВ с повышенной адгезионной способностью. Сущность технологии состоит в обработке волокнистых полуфабрикатов (единичных волокон, жгутов или тканей) короткоимпульсным ЛИ с длиной волны $\lambda_0 = 1,06$ мкм, напряжением на накопителе $E_n = 700 \div 900$ В при числе импульсов $1 \div 10$. Модифицированные полуфабрикаты в виде мерных отрезков подвергали воздействию напряжения сжатия в замкнутом объеме формы в диапазоне значений $100 \div 300$ МПа. Полученные продукты диспергирования с оптимальными размерными параметрами использовали для модифицирования ПТФЭ в состоянии промышленной поставки (марки Ф4, Ф-4М) с использованием традиционного технологического оборудования – лопастных смесителей. Для обеспечения эффективного совмещения компонентов на стадии подготовки использовали метод механохимического активирования, разработанный в работах С.В. Авдейчика и сотр. [1]. Анализ особенностей морфологии и фракционного состава свидетельствует о том, что лазерное модифицирование обеспечивает не только развитую морфологию поверхностного слоя, но и получение частиц с более стабильными размерными параметрами (рисунк 6). Предварительная обработка фрагментов УВ ЛИ увеличивает долю фракций оптимальных размеров, находящихся в диапазоне $(50 \div 100)$ мкм. Технология лазерного модифицирования предпочтительнее технологии термоокислительной обработки, т.к. не только повышает диспергируемость, но и увеличивает совместимость компонентов, снижая дефектность заготовок. Необходимо подчеркнуть эффективность разработанного метода диспергирования УВ с применением деформаций сжатия по сравнению с дисмембраторным методом, который сопряжен со значительными энергетическими затратами, потерей значительных количеств дисперсных продуктов, не улавливаемых фильтрами.

Использование диспергированного по разработанному процессу УВ в сочетании с технологией механохимического совмещения компонентов позволила повысить па-

параметры деформационно-прочностных характеристик в $1,3 \div 1,5$ раза ($\sigma_p = 22,5$ МПа) и износостойкости в $1,1 \div 1,3$ раза ($J = 1,5 \cdot 10^{-7}$ мм³/Нм) по сравнению с параметрами композитов аналогичного состава «Флубон» и «Флувис».



1 – немодифицированное УВ; 2 – модифицированное ЛИ

Рисунок 6. – Фракционный состав УВ, подвергнутых механическому диспергированию в дисмембраторе (1) и методом деформирования сжатием (2)

К числу распространенных методов повышения эксплуатационного ресурса трибосистем, эксплуатируемых в условиях действия абразивных и коррозионных сред, относится нанесение композиционных покрытий на рабочие поверхности электролитическим, плазменно-дуговым, вакуумным и др. методами.

Разработаны составы и технологии электролитических композиционных покрытий на основе хрома, модифицированного продуктами лазерного диспергирования полимерных и углеродных полуфабрикатов.

Лазерное воздействие на блочный полуфабрикат (ПТФЭ, ПЭТФ, ПА6, ПЭВД, электродный графит) в жидкофазной среде приводит к протеканию процессов абляции с поверхностного слоя с образованием высокодисперсных продуктов (рисунок 7).

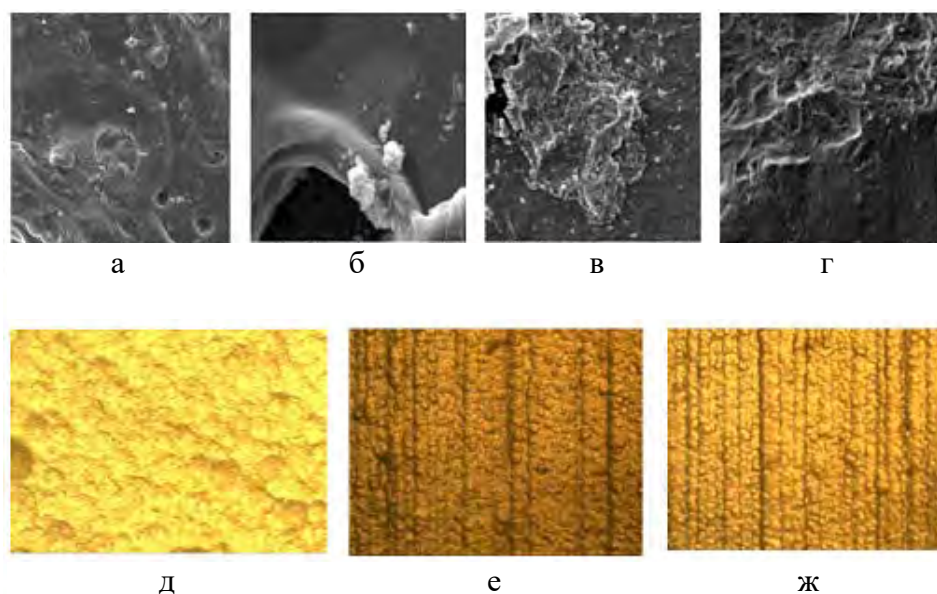


Рисунок 7. – Морфология частиц лазерного диспергирования (а, б, в, г) блоков ПЭТФ (а), ПА6 (б), ПЭВД (в), ПТФЭ (г) и покрытий на основе Cr (д, е, ж) исходного (д) и модифицированного 0,4 мас. % ПТФЭ (е) и 0,8 мас. % ПТФЭ (ж)

При диспергировании в среде электролита формируется устойчивая суспензия, которая обеспечивает модифицирование матричного Сг и образование покрытия с характерной морфологией (рисунки 7а-7г). Продукты диспергирования различных блоков, образованных по механизму абляции, имеют наноразмерный диапазон и активное состояние. Благодаря этому изменяется кинетика формирования покрытий на основе электролитического Сг, и образуется композиционная структура с повышенной однородностью (рисунки 7д-7ж). Нанокпозиционные покрытия на основе электролитического Сг, модифицированного 0,4÷2 мас. % продуктов абляции в электролите, обладают повышенными параметрами триботехнических и защитных характеристик. В процессе изнашивания наноразмерные продукты абляции ПТФЭ, ПЭНД, ПЭТФ, ПАб, электродного графита выполняют функцию сухой смазки, снижают коэффициент трения при эксплуатации покрытия без подвода внешней смазки. Разработанные составы электролитических покрытий рекомендованы для восстановления клапанов тепловозных двигателей, эксплуатируемых на БелЖД.

Лазерное модифицирование поверхностных слоев компонентов металлополимерных систем позволяет формировать оптимальную морфологию уплотнительных элементов, используемых в запорной и регулирующей арматуре газо- и водопроводов низкого давления. Формируемый на поверхности нанорельеф при воздействии короткоимпульсного ЛИ с интенсивностью 3÷30 Дж позволяет обеспечить закрепление компонентов смазочного состава и его действие при эксплуатации арматуры в режиме «старт-стоп» и реверсивного характера движения. При использовании в качестве сухой смазки продуктов термогазодинамического синтеза ПТФЭ, выпускаемых под торговой маркой «Форум», реализуется эффект знакопеременного переноса и формирования устойчивого разделительного слоя, повышающего герметичность подвижного сопряжения. Разработаны рекомендации для повышения параметров эксплуатационных характеристик запорной и регулирующей арматуры, используемой в газопроводных системах при температурах 213÷333 К, которую производит ПУП «Цветлит».

Заключение

Проведены комплексные исследования закономерностей формирования структуры и морфологии поверхностных слоев компонентов материалов на основе термопластичных и металлополимерных систем короткоимпульсным ЛИ с длительностью импульса 0,8÷2,0 мс и энергией импульса 0,5÷50 Дж. Определены направления применения компонентов и изделий, модифицированных короткоимпульсным ЛИ различной энергии, в материаловедении и технологии полимерных композитов на основе термопластичных матриц.

Разработаны составы нанокпозиционных материалов на основе хрома и технология формирования электролитических покрытий с повышенными параметрами триботехнических и защитных характеристик. Показано, что введение в состав хромового электролита 0,6÷2,3 мас. % продуктов абляции полимерных и углеродных субстратов, оптимизирует структуру покрытия, морфологию поверхностного слоя и в 1,1÷1,3 раза увеличивает его стойкость к коррозионно-механическому изнашиванию.

Разработаны составы и технология композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, в 1,1÷1,5 раза превышающими параметры промышленно выпускаемых аналогов «Флубон», «Флувис» при содержании наполнителя 20÷30 мас. %. Показано, что использование в качестве функционального наполнителя фрагментов УВ оптимального фракционного состава 90÷100 мкм, полученного механическим деформиро-

ванием при давлениях $\sigma_{сж} = 80 \div 100$ МПа волокнистых полуфабрикатов, модифицированных короткоимпульсным ЛИ с продолжительностью импульса $0,8 \div 1,8$ мс напряжением накопителя $500 \div 900$ В, снижает дефектность композита, увеличивает совместимость матричного связующего и УВ, а также увеличивает параметры их эксплуатационных характеристик.

Список цитированных источников

1. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение: монография / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2012. – 339 с.
2. **Пинчук, Л.С.** Электретные материалы в машиностроении / Л.С. Пинчук, В.А. Гольдаде. – Гомель: Инфотрибо, 1998. – 288 с.
3. Модифицирование углеволокон, используемых для наполнения политетрафторэтилена / В.А. Шелестова [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2004. – Т. 6., № 3. – С. 86-89.
4. Введение в физику нанокompозиционных машиностроительных материалов / С.В. Авдейчик [и др.]; под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 439 с.
5. **Саид-Галиев, Э.Е.** Модификация полимеров и композитов под действием CO_2 -лазера. Обзор / Э.Е. Саид-Галиев, Л.Н. Никитин // Механика композитных материалов. – 1992. – № 6. – С. 723-734.
6. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / под ред. Д.М. Поута и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 424 с.
7. Изменение надмолекулярной структуры полимеров под действием лазерного излучения / Н.И. Тишков [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2004. – Т. 9., № 2. – С. 68-72.
8. **Yeh, J.T.C.** Laser ablation of polymers / J.T.C. Yeh // J. Vac. Sci. Technol. – 1986. – n. 3, Pt. 1. – P. 653-658.
9. **Иванов, А.Ю.** Акустическая эмиссия в ходе формирования новых фаз при лазерной обработке материалов / А.Ю. Иванов // Веснік ГрДУ. – 2006. – Сер. 2, № 2. – С. 81-85.

Sarokin V.G., Avdeychik S.V., Antonov A.S., Ishchenko M.V., Struck V.A., Sazonko G.G.

Composite materials based on thermoplastics and modified by short-pulse laser radiation of components

The article presents and investigation of the effect of short-pulse laser radiation with different energy per pulse on the parameters of structure, morphology and energy condition of components that are used for production of functional materials based on polymeric matrices. Differences of action of low-energy and high-energy flows on the prevailing mechanisms of transforming of the surface layers of dispersed particles, fibrous and film components have been established. Directions of efficient use of components modified by laser radiation during creation of materials for static and dynamics (triboengineering) metal-polymer systems have been illustrated.

Поступила в редакцию 18.05.2016 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-обогажительного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогажительных 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



Телефоны:

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

(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь

E-mail: ontipr@tut.by

<http://www.sipr.by>